Fitria Amastini dkk

ACCELERATING SUSTAINABLE INNOVATION

Towards Society 5.0

EDITOR
DINI NUR HAKIKI, DARSIH IDAYANI,
SRI UTAMI, SRI HARIJATI, DIAN NURDIANA

PENERBIT UNIVERSITAS TERBUKA

UNIVERSITAS TERBUKA

Fitria Amastini dkk

ACCELERATING SUSTAINABLE INNOVATION

Towards Society 5.0

EDITOR
DINI NUR HAKIKI, DARSIH IDAYANI,
SRI UTAMI, SRI HARIJATI, DIAN NURDIANA

PENERBIT UNIVERSITAS TERBUKA

Accelerating Sustainable Innovation Towards Society 5.0

Penulis:

1. Fitria Amastini, S.Kom., M.T.I.
2. Dwinanda K. Suci Sekarhati, S.Kom., M.T.I.
3. Dra. Dwi Astuti Aprijani, M.Kom.
4. Dr. Fatia Fatimah, S.Si., M.Pd.
5. Darsih Idayani, M.Si.
6. Siti Umamah Naili Muna, S.Si., M.Si.
7. Selly Anastassia Amellia Kharis, S.Pd., M.Si.
8. Muhammad Givari Ramdhani
9. Elin Herlinawati, S.Pd., M.Si.
10. Wahyu Hidayat, M.Si.
11. Deddy Ahmad Suhardi, S.Si., M.M.
12. Ir. Sri Yuniati Putri Koes Hardini, M.P.
13. Heny Kurniawati, S.ST., M.Kes.
14. Mutimanda Dwisatyadini, M.Kep.
15. Sri Utami, S.ST., M.Kes.
16. Fawzi Rahmadiyan Zuhairi, S.Si., M.Sc.
17. Siti Hadijah Hasanah, S.Si., M.Si.
18. Adhi Susilo, S.Pt., M.Biotech.St., Ph.D.
19. Sigit Supriyadi, S.Si., Msi.
20. Dini Nur Hakiki, S.T.P., M.Si.
21. Athiefah Fauziyyah, S.T.P., M.Si.
22. Dra. Eko Yuliastuti E.S, M.Si.
23. Mutiara Ulfah, S.T.P., M.Sc.
24. Rina Rismaya, S.T.P., M.Si.
25. ing. M. Rajih Radiansyah, B.AS., M.Sc.
26. Iffana Dani Maulida, S.Si., M.Sc.
27. Rozana, S.TP., M.Si.
28. Ariyanti Hartari, S.T.P., M.Si.
29. Sazli Tutur Risyahadi, S.T.P., M.T., M.Si.
30. Dr. Ir. Nurmala Pangaribuan, M.S.
31. Sri Maulidia Permatasari, S.Si., M.Si.
32. Dr. Sri Listyarini, M.Ed.
33. Guruh Sri Pamungkas, S.Pt. M.Si
34. Mirza Permana, S.T., M.Si.
35. Guntur Bagus Pamungkas, S.T., M.P.W.K
36. Erika Pradana Putri, ST., M.Sc.
37. Ulul Hidayah, S.T., M.Si
38. Dr. Abdillah Munawir, S.P., M.Si, CIRR
39. Prof. Dr. Ir. Tania June, M.Sc
40. Prof. Dr. Ir. Cecep Kusmana, MS
41. Dr. Yudi Setiawan, S.P., M.Env.Sc.
42. Anindya Putri Tamara, S.T., M.P.W.K.
43. Galih Hendro Wijayanto
44. Dr. Sodikin, S.Pd., M.Si., M.P.W.K.
45. Kusuma Lelana Ari Lestari, S.Si.
46. Fauzi Fahmi
47. Dr. Lina Warlina, M.Ed.
48. Dr. Agus Susanto, M.Si.
49. Drs. Sumartono, M.Si.
50. Dr. A. Hadian Pratama Hamzah, S.IP., M.I.L.
51. Dr. Ir. Nurhasanah, M.Si.
52. Sohifah, S.T.,M.I.L.
53. Farisa Maulinam Amo, S.T., M.T.
54. Dr. Jalil, S.Pi., M.P.
55. Prof. Dr. Achmar Mallawa, DEA
56. Dr. Ir. Faisal Amir, M.Si.
57. Safruddin, Spi., MP, Ph.D.

ISBN: 978-623-480-775-2 e- ISBN: 978-623-480-776-9.

Penyunting:

1. Dini Nur Hakiki, S.T.P., M.Si.
2. Darsih Idayani, M.Si.
3. Sri Utami, S.ST., M.Kes.
4. Dr. Sri Harijati, M.A.
5. Dian Nurdiana, S.Kom., M.Kom.

Penata letak : Nono Suwarno
Perancang Kover dan Ilustrasi : Sunarti, S.Des.

Penerbit:
Universitas Terbuka
Kementrian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi
Jalan Cabe Raya, Pondok Cabe, Pamulang, Tangerang Selatan - 15437
Banten – Indonesia
Telp.: (021) 7490941 (hunting); Fax.: (021) 7490147
Laman: www.ut.ac.id.

Cetakan pertama, Oktober 2022

© 2022 oleh Universitas Terbuka

*Buku ini di bawah lisensi *Creative Commons* Atribusi Nonkomersial Tanpa turunan 4.0 Internasional oleh Universitas Terbuka, Indonesia. Kondisi lisensi dapat dilihat pada Http: //creative commons.or.id/*

Universitas Terbuka: Katalog Dalam Terbitan (Versi RDA)

Nama: Fitria Amastini
Judul: Accelerating Sustainable Innovation Towards Society 5.0 (BNBB) / penulis, Fitria Amastini, S.Kom., M.T.I., Dwinanda K. Suci Sekarhati, S.Kom., M.T.I. , Dra. Dwi Astuti Aprijani, M.Kom., Dr. Fatia Fatimah, S.SI., M.Pd., Darsih Idayani, M.Si., Siti Umamah Naili Muna, S.Si., M.Si., Selly Anastassia Amellia Kharis, S.Pd., M.Si., Muhammad Givari Ramdhani, Elin Herlinawati, S.Pd., M.Si., Wahyu Hidayat, M.Si., Deddy Ahmad Suhardi, S.Si., M.M., Ir. Sri Yuniati Putri Koes Hardini, M.P., Heny Kurniawati, S.ST., M.Kes., Mutimanda Dwisatyadini, M.Kep., Sri Utami, S.ST., M.Kes., Fawzi Rahmadiyan Zuhairi, S.Si., M.Sc., Siti Hadijah Hasanah, S.Si., M.Si., Adhi Susilo, S.Pt., M.Biotech.St., Ph.D., Sigit Supriyadi, S.Si., Msi., Dini Nur Hakiki, S.T.P., M.Si., Athiefah Fauziyyah, S.T.P., M.Si., Dra. Eko Yuliastuti E.S, M.Si., Mutiara Ulfah, S.T.P., M.Sc., Rina Rismaya, S.T.P., M.Si., ing. M. Rajih Radiansyah, B.AS., M.Sc., Iffana Dani Maulida, S.SI., M.Sc., Rozana, S.TP., M.Si., Ariyanti Hartari, S.T.P., M.Si., Sazli Tutur Risyahad, S.T.P., M.T., M.Si., Dr. Ir. Nurmala Pangaribuan, M.S., Sri Maulidia Permatasari, S.Si., M.Si., Dr. Sri Listyarini, M.Ed., Guruh Sri Pamungkas, S.Pt. M.Si, Mirza Permana, S.T., M.Si, Guntur Bagus Pamungkas, S.T., M.P.W.K., Erika Pradana Putri, ST., M.Sc., Ulul Hidayah, ST., M.Si, Dr. Abdillah Munawir, S.P., M.Si, CIRR, Prof. Dr. Ir. Tania June, M.Sc, Prof. Dr. Ir. Cecep Kusmana, MS, Dr. Yudi Setiawan, S.P., M.Env.Sc , Anindya Putri Tamara, S.T., M.P.W.K., Galih Hendro Wijayanto, Dr. Sodikin, S.Pd., M.Si., M.P.W.K., Kusuma Lelana Ari Lestari, M.Si., Fauzi Fahmi, Dr. Lina Warlina, M.Ed., Dr. Agus Susanto, M.Si., Drs. Sumartono, M.Si., Dr. A. Hadian Pratama Hamzah, S.IP., M.I.L., Dr. Ir. Nurhasanah, M.Si., Sohifah, S.T.,M.I.L., Farisa Maulinam Amo, S.T., M.T., Dr. Jalil, S.Pi., M.P., Prof. Dr. Achmar Mallawa, DEA, Dr. Ir. Faisal Amir, M.Si., Safruddin, S.Pi., MP, Ph.D. ; penyunting, Dini Nur Hakiki, S.T.P., M.Si., Darsih Idayani, M.Si., Sri Utami, S.ST., M.Kes, Dr. Sri Harijati, M.A., Dian Nurdiana, S.Kom., M.Kom. ; penata letak, Nono Suwarno ; perancang kover dan ilustrasi, Sunarti, S.Des.
Cetakan : 1
Deskripsi : Tangerang Selatan : Universitas Terbuka, 2022 | 795 halaman ; 21 cm
(termasuk daftar referensi)
ISBN : 978-623-480-775-2 e-ISBN : 978-623-480-776-9
Subyek : 1. Inovasi, Sains dan Teknologi
2. Innovation, Science and Technology
Nomor klasifikasi : 608 [23] 202200519
Dicetak oleh PT. Gramedia

PENGANTAR DEKAN
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

Alhamdulillah, puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan kekuatan, ketekunan, dan kesabaran sehingga buku dari Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Terbuka (FST-UT) tahun 2022 dengan tema "*Accelerating Sustainable Innovation Towards Society 5.0*" dapat diselesaikan. Buku ini merupakan bentuk komitmen akademik para dosen FST-UT untuk memberikan sumbangsih keilmuan berupa ide, gagasan, dan pemikiran sebagai hasil dari kajian ilmiah dan riset yang dituangkan dalam bentuk artikel dalam buku ini.

Berdasarkan tema yang diangkat, buku ini mengulas tentang berbagai upaya pencapaian Society 5.0 melalui percepatan inovasi yang berkelanjutan khususnya di bidang sains dan teknologi. Secara konsep, *Society* 5.0 atau Masyarakat 5.0 merupakan suatu era masyarakat yang diharapkan dapat menyelesaikan berbagai tantangan dan permasalahannya dengan memanfaatkan berbagai inovasi yang disesuaikan dengan perkembangan sains dan teknologi. Society 5.0 mempunyai visi yaitu menyelaraskan hubungan antara teknologi dan masyarakat. Salah satu upaya yang bisa ditempuh dalam pencapaian Society 5.0 adalah melalui percepatan inovasi yang berkelanjutan. Inovasi berkelanjutan (*Sustainable Innovation*) memiliki makna bahwa suatu inovasi tidak hanya mementingkan aspek ekonomi, namun perlu memperhatikan aspek sosial, dan lingkungan. Inovasi tersebut tidak hanya berfokus pada keuntungan, namun juga memperhatikan manfaat jangka panjang melalui pemaksimalan penggunaan sumber daya yang sudah ada. Dengan demikian, keberadaan inovasi berkelanjutan ini membuat teknologi yang dihasilkan menjadi lebih kompetitif, lebih dapat bertahan, dan mampu memunculkan teknologi baru yang lebih baik lagi.

Pada buku ini, berbagai bentuk inovasi berkelanjutan untuk mendukung pencapaian Society 5.0 di kelompokkan dalam 3 (tiga) topik besar yaitu (1) *Science and Mathematics for Innovation*; (2) *Sustainable Food and Agriculture*, dan (3) *Environment and Sustainable Development*. Pengembangan inovasi yang dikelompokkan pada tiga topik tersebut mengacu

pada bidang ilmu dan kepakaran dosen FST-UT, serta mewadahi 9 (sembilan) program studi di FST meliputi Program Studi Sistem Informasi, Matematika, Statistika, Teknologi Pangan, Agribisnis, Biologi, Perencanaan Wilayah Kota, Manajemen Perikanan (S2), dan Studi Lingkungan (S2).

Pada topik *Science and Mathematics for Innovation,* gagasan inovasi untuk pencapaian Society 5.0 didasarkan pada kajian konsep dan penerapan bidang sistem informasi, matematika, dan statistika. Diawali dengan pengembangan inovasi yang diperuntukkan bagi sistem pendidikan di Indonesia, khususnya di UT, yaitu melalui pengembangan *Extended Reality* dalam peningkatan teknologi pembelajaran berbasis inkuiri menuju era Metaverse; lalu pemanfaatan big data untuk survei persepsi minat calon mahasiswa terhadap program studi baru di Universitas Terbuka, serta penerapan analisis faktor untuk menentukan faktor laten yang mempengaruhi kepuasan peserta didik terhadap video pembelajaran interaktif. Di bidang matematika, beberapa inovasi yang dikembangkan adalah pengaplikasian N-Soft Rough Sets untuk pengambilan keputusan multi kriteria; pemanfaatan riset operasi untuk penyelesaian masalah pemilihan lokasi fasilitas, dan penggunaan metode Fuzzy C-Means untuk analisis cluster provinsi di Indonesia yang bermanfaat untuk pemerataan infrastruktur jalan. Inovasi lain di bidang matematika yang dibahas dalam buku ini adalah: produk asuransi pertanian didasarkan pada indeks curah hujan untuk menjamin komoditas pertanian dari kasus kebanjiran; penggunaan Integral Henstock-Kurzweil sebagai inovasi dalam perkembangan teori integral pada beberapa masalah persamaan diferensial; dan pengembangan representasi tunggal Aljabar-C* sehingga memiliki bentuk graf berarah baris-berhingga.

Pada topik *Sustainable Food and Agriculture*, pengembangan inovasi untuk pencapaian Society 5.0 berfokus pada kajian-kajian keberlanjutan pangan dan pengembangan lahan pertanian. Inovasi untuk menjamin keberlanjutan pangan, adalah dengan pemaksimalan hasil produksi (output) dan peminimalan kehilangan pangan pada komoditas hortikultura; pengembangan makanan tradisional menjadi pangan fungsional berbasis fermentasi; pemanfaatan komoditas umbi-umbian sebagai alternatif sumber karbohidrat; pemanfaatan potensi

tepung umbi-umbian termodifikasi sebagai alternatif pengganti terigu; pemanfaatan "tanaman kelor" sebagai makanan super dalam pertanian berkelanjutan; serta inovasi pengolahan "talas beneng" untuk mendukung keberagaman konsumsi pangan masyarakat 5.0. Pendidikan kewirausahaan terkait produk pangan juga diulas sebagai upaya peningkatan kapasitas SDM dalam pencapaian Society 5.0. Sementara di bidang pertanian, pengembangan inovasi berkelanjutan dilakukan melalui konservasi lahan bekas galian C untuk lahan pertanian yang mengadopsi teknologi ramah lingkungan, revegetasi, fitoremediasi, pemberian bahan organik, dan mikroorganisme tanah yang dapat mendukung pemenuhan kebutuhan pangan.

Topik *Environment and Sustainable Development*, beberapa inovasi didasarkan pada kajian bidang biodiversitas, studi lingkungan, dan pembangunan berkelanjutan. Bentuk inovasi yang dikembangkan adalah: upaya meminimalisir dampak negatif revolusi hijau melalui pertanian organik berbasis limbah biomassa kelapa sawit, pengembangan model dinamika *Urban Heat Island* (UHI) berdasarkan tren penggunaan lahan, pengukuran evapotranspirasi menggunakan *surface energy balance algorithm for land*, dan pengembangan program kota hijau dan bersih sebagai paradigma lingkungan dalam pengelolaan sampah. Selain itu, inovasi juga dikembangkan melalui: pemanfaatan sumberdaya perikanan Tuna Madidihang (*Thunnus albacares*) secara berkelanjutan, dinamika spasial penambahan daratan dan korelasinya terhadap luasan mangrove, dan pemetaan parameter fisik kimia mangrove dengan pemanfaatan sistem informasi geografis. Gagasan tentang peningkatan aksesibilitas untuk mendukung aktivitas masyarakat di era 5.0 melalui pengembangan inovasi sistem kereta api juga dikaji pada buku ini.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada berbagai pihak yang terlibat dalam pembuatan buku ini yaitu penulis, penelaah, editor, *layouter*, *ilustrator*, dan sejumlah pihak lain yang tidak kenal lelah dalam pengembangannya, mulai awal proses hingga penerbitan dan peluncuran buku. Buku ini dapat terwujud karena adanya kerjasama, komitmen, kerja keras, dan semangat dari tim pengembang buku yang juga membuktikan bahwa proses tidak menghianati hasil, yaitu dengan membuahkan karya ilmiah

berupa buku ini. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya juga kami sampaikan kepada Rektor UT, Para Wakil Rektor, dan Seluruh Pimpinan Unit di UT yang telah memberikan arahan, dukungan, dan bantuannya dalam berbagai bentuk, sehingga buku ini dapat tersusun dan terbit pada waktunya. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada semua pimpinan FST-UT yaitu Wakil Dekan, Ketua Jurusan, Ketua Program Studi, Koordinator dan Sub Koordinator, serta seluruh Dosen dan Tenaga Kependidikan di FST-UT yang telah memberikan perhatian, dukungan, kerjasama, dan komitmennya untuk turut serta menjadi bagian penting dalam pengembangan buku ini.

Buku ini sangat istimewa, karena berisi 26 karya ilmiah yang ditulis oleh 57 dosen FST UT secara individu, berkolaborasi dengan sesama dosen dan mahasiswa UT, maupun berkolaborasi dengan dosen dari perguruan tinggi lain. Ide, gagasan, pemikiran, dan kreativitas akademik penulis dalam buku ini diharapkan dapat memberi manfaat, wawasan, dan menginspirasi para pembaca secara lebih luas, khususnya dalam pencapaian Society 5.0 melalui inovasi berkelanjutan. Kami menyadari masih adanya kekurangan dalam buku ini, oleh karena itu kritik dan saran dari pembaca akan sangat berguna untuk penyempurnaan dan peningkatan kualitas buku berikutnya, maupun untuk pengembangan kajian ilmiah bidang sains dan teknologi.

Terimakasih atas perhatiannya.

Tangerang Selatan, Oktober 2022
Dekan FST Universitas Terbuka

Dr. Subekti Nurmawati, M.Si.
NIP. 196705181991032001

DAFTAR ISI

PENGANTAR DEKAN FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI ..... **i**
DAFTAR ISI ..... **v**
DAFTAR TABEL ..... **xiii**
DAFTAR GAMBAR ..... **xxi**
Accelerating Sustainable Innovation Towards Society 5.0 **xxxi**
Tim Editor

01 *SCIENCE AND MATHEMATICS FOR INNOVATION*

IMPLIKASI INOVASI *EXTENDED REALITY* DI PERGURUAN TINGGI INDONESIA TERHADAP METAVERSE

THE IMPLICATIONS OF EXTENDED REALITY INNOVATION IN INDONESIA'S HIGHER EDUCATION TOWARDS METAVERSE
Fitria Amastini, Dwinanda Suci Sekarhati, Dwi Astuti Aprijani **1**

PENGAMBILAN KEPUTUSAN MULTI KRITERIA MENGGUNAKAN *N-SOFT ROUGH SETS*

MULTI-CRITERIA DECISION MAKING USING N-SOFT ROUGH SETS
Fatia Fatimah **33**

OPTIMASI MASALAH LOKASI FASILITAS DALAM RISET OPERASI DAN APLIKASINYA DI INDONESIA

OPTIMIZATION OF FACILITY LOCATION PROBLEM IN OPERATIONS RESEARCH AND ITS APPLICATION IN INDONESIA
Darsih Idayani **69**

PRODUK ASURANSI PERTANIAN INDEKS CURAH HUJAN UNTUK MENJAMIN KOMODITAS PERTANIAN DARI KASUS KEBANJIRAN

CROP INSURANCE PRODUCT BASED ON RAINFALL INDEX TO ENSURE AGRICULTURAL COMMODITY FROM CASE OF FLOODING
Siti Umamah Naili Muna **95**

ANALISIS CLUSTER PROVINSI DI INDONESIA BERDASARKAN KONDISI KERUSAKAN DAN PERMUKAAN JALAN MENGGUNAKAN *METODE FUZZY C-MEANS*

PROVINCIAL CLUSTER ANALYSIS IN INDONESIA BASED ON CONDITIONS ROAD DAMAGE AND SURFACE USING FUZZY C-MEANS
Selly Anastassia Amellia Kharis, Muhammad Givari R **127**

INTEGRAL HENSTOCK-KURZWEIL: INOVASI DALAM PERKEMBANGAN TEORI INTEGRAL DAN PENERAPANNYA PADA BEBERAPA MASALAH PERSAMAAN DIFERENSIAL

HENSTOCK-KURZWEIL INTEGRAL: INNOVATION IN THE DEVELOPMENT OF INTEGRAL THEORY AND ITS APPLICATION TO SOME DIFFERENTIAL EQUATION PROBLEMS
Elin Herlinawati **153**

REPRESENTASI TUNGGAL ALJABAR-*C** DARI GRAF BERARAH BARIS-BERHINGGA

UNIQUE REPRESENTATION OF C-ALGEBRA OF ROW-FINITE DIRECTED GRAPH*
Wahyu Hidayat **185**

SURVEI PERSEPSI MINAT CALON MAHASISWA TERHADAP PROGRAM STUDI MANAJEMEN INFORMASI KESEHATAN DI UNIVERSITAS TERBUKA

SURVEY ON THE PERCEPTIONS OF PROSPECTIVE STUDENTS' INTENTIONS OF HEALTH INFORMATION MANAGEMENT STUDY PROGRAM BY UNIVERSITAS TERBUKA
Deddy Ahmad Suhardi, Sri Yuniati Putri Koes Hardini, Heny Kurniawati, Mutimanda Dwisatyadini, Sri Utami, Fawzi Rahmadiyan Zuhairi 215

PENERAPAN ANALISIS FAKTOR DALAM MEMBENTUK FAKTOR LATEN YANG MEMENGARUHI KEPUASAN PESERTA DIDIK MATAKULIAH KIMIA DASAR TERHADAP VIDEO PEMBELAJARAN INTERAKTIF

THE APPLICATION OF FACTOR ANALYSIS IN FORMING LATENT FACTORS WHICH AFFECTS THE SATISFACTION OF BASIC CHEMISTRY COURSE STUDENT TOWARD INTERACTIVE LEARNING VIDEOS
Siti Hadijah Hasanah, Adhi Susilo, Sigit Supriyadi 245

02 *SUSTAINABLE FOOD AND AGRICULTURE*

PERANAN PENANGANAN DAN TEKNOLOGI PASCAPANEN DALAM MENGURANGI KEHILANGAN PANGAN PADA KOMODITAS HORTIKULTURA

THE ROLE OF POST-HARVEST HANDLING AND TECHNOLOGY IN REDUCING FOOD LOSS IN HORTICULTURAL COMMODITIES
Dini Nur Hakiki, M. Rajih Radiansyah, Eko Yuliastuti E.S., Athiefah Fauziyyah, Rina Rismaya, Mutiara Ulfah, Rozana 281

POTENSI PANGAN FUNGSIONAL PADA MAKANAN TRADISIONAL INDONESIA BERBASIS FERMENTASI

THE POTENCY OF FUNCTIONAL FOOD IN INDONESIAN TRADITIONAL FERMENTED FOOD
Athiefah Fauziyyah, Eko Yuliastuti E.S., Dini Nur Hakiki, M Rajih Radiansyah, Rina Rismaya, Mutiara Ulfah 307

KOMODITAS UMBI-UMBIAN SEBAGAI ALTERNATIF SUMBER KARBOHIDRAT

TUBERS AS AN ALTERNATIVE SOURCE OF CARBOHYDRATE
Eko Yuliastuti E.S., Athiefah Fauziyyah, Dini Nur Hakiki, Mohamad Rajih Radiansyah, Rina Rismaya, Mutiara Ulfah 331

POTENSI TEPUNG UMBI – UMBIAN TERMODIFIKASI SEBAGAI ALTERNATIF PENGGANTI TERIGU

POTENTIAL OF MODIFIED TUBERS FLOUR AS AN ALTERNATIVE TO WHEAT SUBSTITUTE
Mutiara Ulfah, Eko Yuliastuti E.S., Athiefah Fauziyyah, Rina Rismaya, Dini Nur Hakiki, Mohamad Rajih Radiansyah..... 357

INOVASI PENGOLAHAN TALAS BENENG UNTUK MENDUKUNG KEBERAGAMAN KONSUMSI PANGAN MASYARAKAT 5.0

INNOVATION ON BENENG YAM PROCESSING TO SUPPORT THE DIVERSITY OF FOOD CONSUMPTION OF SOCIETY'S 5.0
Ariyanti Hartari 385

POTENSI TANAMAN KELOR DALAM PERTANIAN BERKELANJUTAN DAN MANFAATNYA SEBAGAI MAKANAN SUPER

THE POTENTIAL OF MORINGA OLEIFERA IN SUSTAINABLE AGRICULTURE AND ITS BENEFITS AS SUPER FOOD
Rina Rismaya, Iffana Dani Maulida, Eko Yuliastuti E.S., Dini Nur Hakiki, Athiefah Fauziyyah, Mutiara Ulfah, Mohamad Rajih Radiansyah 407

PENDIDIKAN KEWIRAUSAHAAN PRODUK PANGAN: STUDI KASUS DI PRODI TEKNOLOGI PANGAN UNIVERSITAS TERBUKA

FOOD ENTREPRENEURSHIP EDUCATION: A CASE STUDY IN FOOD TECHNOLOGY DEPARTMENT OF UNIVERSITAS TERBUKA
Adhi Susilo dan Sazli Tutur Risyahadi 431

KONSERVASI LAHAN BEKAS GALIAN C UNTUK LAHAN PERTANIAN

CONSERVATION OF SAND PITS FOR CULTIVATED LAND
Nurmala Pangaribuan, Sri Maulidia Permatasari 459

03 ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

MEMINIMALKAN DAMPAK NEGATIF REVOLUSI HIJAU MELALUI PERTANIAN ORGANIK BERBASIS LIMBAH BIOMASSA KELAPA SAWIT DI PERKEBUNAN SAWIT PT. TEBO INDAH, JAMBI

MINIMIZING THE NEGATIVE IMPACT OF THE GREEN REVOLUTION THROUGH ORGANIC AGRICULTURE BASED ON PALM BIOMASS WASTE IN PALM OIL PLANTATION PT. TEBO INDAH, JAMBI
Sri Listyarini, Guruh Sri Pamungkas 483

MODEL DINAMIKA URBAN HEAT ISLAND (UHI) BERDASARKAN TREN PENGGUNAAN LAHAN DI KOTA BALIKPAPAN, KALIMANTAN TIMUR

MODEL OF URBAN HEAT ISLAND (UHI) DYNAMICS BASED ON LAND USE TRENDS IN BALIKPAPAN CITY, EAST KALIMANTAN
Mirza Permana, Guntur Bagus Pamungkas, Erika Pradana Putri, Ulul Hidayah 515

KETERSEDIAAN EVAPOTRANSPIRASI MENGGUNAKAN SURFACE ENERGI BALANCE ALGORITHM FOR LAND DI TAMAN NASIONAL LORE LINDU PROVINSI SULAWESI TENGAH

EVAPOTRANSPIRATION AVAILABILTY USING SURFACE ENERGI BALANCE ALGORITHM FOR LAND IN LORE LINDU NASIONAL PARK CENTRAL SULAWESI PROVINCE
Abdillah Munawir, Tania June, Cecep Kusmana, Yudi Setiawan..... 543

PENGENDALIAN DEFORESTASI DI KABUPATEN BANJARNEGARA, PROVINSI JAWA TENGAH, INDONESIA: IMPLIKASINYA UNTUK MEMBANGUN EKONOMI HIJAU

CONTROLLING DEFORESTATION IN BANJARNEGARA DISTRICT, CENTRAL JAVA PROVINCE, INDONESIA: IMPLICATION FOR FOSTERING GREEN ECONOMY
Guntur Bagus Pamungkas, Anindya Putri Tamara, Galih Hendro Wijayanto 565

DINAMIKA SPASIAL PENAMBAHAN DARATAN SERTA KORELASINYA TERHADAP LUASAN MANGROVE DI DELTA CIMANUK KABUPATEN INDRAMAYU PROVINSI JAWA BARAT

SPATIAL DYNAMICS OF LAND ADDITION AND THEIR CORRELATION TO MANGROVE AREA IN CIMANUK DELTA, INDRAMAYU REGENCY, WEST JAVA PROVINCE
Sodikin, Kusuma Lelana Ari Lestari, Fauzi Fahmi 593

PEMETAAN PARAMETER FISIK KIMIA MANGROVE DENGAN PEMANFAATAN SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS DI KAWASAN PESISIR INDRAMAYU

MAPPING PHYSICAL CHEMICAL PARAMETERS OF MANGROVE WITH THE UTILIZATION OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS IN THE INDRAMAYU COASTAL AREA
Lina Warlina, Agus Susanto, Sumartono, Sodikin 621

PROGRAM BANDUNG HIJAU DAN BERSIH: PARADIGMA LINGKUNGAN DAN KEBIJAKAN PUBLIK DALAM PENGELOLAAN SAMPAH

GREEN AND CLEAN BANDUNG PROGRAM: ENVIRONMENTAL PARADIGM AND PUBLIC POLICY IN WASTE MANAGEMENT
A Hadian Pratama Hamzah, Nurhasanah, Sohifah 651

KEBUTUHAN KERETA API PENUMPANG PADA KORIDOR MANADO-BITUNG

THE NEED OF COMMUTER RAIL ON MANADO-BITUNG CORRIDOR
Farisa Maulinam Amo 677

PEMANFAATAN SUMBERDAYA PERIKANAN TUNA MADIDIHANG (*Thunnus albacares*) SECARA BERKELANJUTAN DI PERAIRAN TELUK BONE

SUSTAINABLE USE OF YELLOWFIN TUNA (Thunnus albacares) FISHERIES RESOURCES IN BONE BAY
Jalil, Achmar Mallawa, Faisal Amir, Safruddin 713

BIODATA PENULIS 733

DAFTAR TABEL

IMPLIKASI INOVASI *EXTENDED REALITY* DI PERGURUAN TINGGI INDONESIA TERHADAP *METAVERSE*
Fitria Amastini, Dwinanda Suci Sekarhati, Dwi Astuti Aprijani
Tabel 1. PICOC Penelitian 5
Tabel 2. KataKunciPencarian..... 5
Tabel 3. Identifikasi dan Pemilihan Literatur Utama 6
Tabel 4. Tahap Uji Kualitas 7
Tabel 5. Hasil Pemilihan Literatur 8
Tabel 6. Jumlah Penelitian Sesuai Kriteria PICOC Berdasarkan Tahun dan Sumber 8

PENGAMBILAN KEPUTUSAN MULTI KRITERIA MENGGUNAKAN *N-SOFT ROUGH SETS*
Fatia Fatimah
Tabel 1. N-Soft Set 40
Tabel 2. (*F,A,*3) Contoh 1 42
Tabel 3. Penilaian Pakar pada Contoh 2..... 46
Tabel 4. Matriks Discernibility u_1 56
Tabel 5. Matriks Discernibility u_2 56
Tabel 6. Matriks *Discernibility* 58
Tabel 7. Distribusi Matriks *Discernibility* 58

OPTIMASI MASALAH LOKASI FASILITAS DALAM RISET OPERASI DAN APLIKASINYA DI INDONESIA
Darsih Idayani
Tabel 1. Perkembangan Penelitian Aplikasi Set Covering Problem di Indonesia (2018-2022) 80
Tabel 2. Perkembangan Penelitian Aplikasi *Maximal Covering* Problem di Indonesia (2018-2022) 82

PRODUK ASURANSI PERTANIAN INDEKS CURAH HUJAN UNTUK MENJAMIN KOMODITAS PERTANIAN DARI KASUS KEBANJIRAN

Siti Umamah Naili Muna

Tabel 1. Nilai Dugaan Parameter dari Distribusi Burr Tipe XII dan Mixture Gamma-2 Komponen 118
Tabel 2. Nilai Statistik dan Keputusan uji Kolmogorov-Smirnov (KS) dari Distribusi Burr Tipe XII dan Mixture Gamma-2 Komponen 119
Tabel 3. Polis Asuransi Pertanian Indeks Curah Hujan untuk Kasus Kebanjiran 121
Tabel 4. Contoh Kasus Premi Tunggal Bersih 122

ANALISIS CLUSTER PROVINSI DI INDONESIA BERDASARKAN KONDISI KERUSAKAN DAN PERMUKAAN JALAN MENGGUNAKAN *METODE FUZZY C-MEANS*

Selly Anastassia Amellia Kharis, Muhammad Givari R

Tabel 1. Daftar Peubah 133
Tabel 2. Karakteristik Jalan di Indonesia Berdasarkan Tingkat Kewenangan Tahun 2020 (km)..... 136
Tabel 3. Tabel 3. Statistik Deskriptif Jalan di Indonesia berdasarkan Tingkat Kewenangan 137
Tabel 4. Uji validitas KMO dan Bartlett's 139
Tabel 5. Rata-Rata Cluster Jalan Nasional Metode Fuzzy C-Means (c = 3)..... 141
Tabel 6. Rata-Rata Cluster Jalan Provinsi Metode Fuzzy C-Means (c = 5) 143
Tabel 7. Rata-rata cluster Jalan Provinsi Metode Fuzzy C-Means (c = 2) 145
Tabel 8. Validitas Fuzzy C-Means 147

SURVEI PERSEPSI MINAT CALON MAHASISWA TERHADAP PROGRAM STUDI MANAJEMEN INFORMASI KESEHATAN DI UNIVERSITAS TERBUKA

Deddy Ahmad Suhardi, Sri Yuniati Putri Koes Hardini, Heny Kurniawati, Mutimanda Dwisatyadini, Sri Utami, Fawzi Rahmadiyan Zuhairi

Tabel 1. Dimensi dan Variabel Instrumen Survei 220
Tabel 2. Profil Partisipan yang Mengenal Program Studi MIK 223
Tabel 3. Jumlah PS MIK Jenjang Diploma dan Sarjana 226
Tabel 4. Statistik Reliabilitas Instrumen 231
Tabel 5. Frekuensi, Kontribusi, dan Karakteristik Partisipan Menurut Area Dimensi 236

PENERAPAN ANALISIS FAKTOR DALAM MEMBENTUK FAKTOR LATEN YANG MEMENGARUHI KEPUASAN PESERTA DIDIK MATAKULIAH KIMIA DASAR TERHADAP VIDEO PEMBELAJARAN INTERAKTIF

Siti Hadijah Hasanah, Adhi Susilo, Sigit Supriyadi

Tabel 1. *Measure of Sampling* (MSA) 254
Tabel 2. Karakteristik Data 258
Tabel 3. Kelas interval dan kriteria 259
Tabel 4. Kriteria Penilaian 259
Tabel 5. Kriterai Indikator berdasarkan Nilai Rata-Rata 261
Tabel 6. Uji Validitas 264
Tabel 7. Uji Reliabilitas 264
Tabel 8. KMO *and Bartlett's Test* 265
Tabel 9. Anti-*image Correlation* 265
Tabel 10. *Communalities* 266
Tabel 11. Total *Variance* 266
Tabel 12. *Rotated Komponen Matrix* 269
Tabel 13. Komponen *Transformation Matrix* 270

POTENSI PANGAN FUNGSIONAL PADA MAKANAN TRADISIONAL INDONESIA BERBASIS FERMENTASI
Athiefah Fauziyyah, Eko Yuliastuti, Dini Nur Hakiki, M Rajih Radiansyah, Rina Rismaya, Mutiara Ulfah
Tabel 1. Jenis Makanan Tradisional Indonesia Berbasis Fermentasi 311

KOMODITAS UMBI-UMBIAN SEBAGAI ALTERNATIF SUMBER KARBOHIDRAT
Eko Yuliastuti Endah Sulistyawati, Athiefah Fauziyyah, Dini Nur Hakiki, Mohamad Rajih Radiansyah, Rina Rismaya, Mutiara Ulfah
Tabel 1. Jumlah Penduduk Indonesia 333
Tabel 2. Tabel 2. Rata-Rata Konsumsi per Kapita Seminggu dari Beberapa Macam Bahan Makanan Penting (Tahun 2016-2020) 338
Tabel 3. Produksi Padi per Hektar (Kuintal) 340
Tabel 4. Luas Lahan Sawah Menurut Provinsi (Ha), 2003–2015 342
Tabel 5. Rata-Rata Pengeluaran Perkapita Seminggu di Daerah Perkotaan Menurut Komoditi Makanan dan Golongan Pengeluaran per Kapita Seminggu (Rupiah/Kapita/ Minggu), 2018-2021 344
Tabel 6. Kandungan Zat Gizi Beras dan Berbagai Jenis Umbi-umbian (100 gram) 345

POTENSI TEPUNG UMBI-UMBIAN TERMODIFIKASI SEBAGAI ALTERNATIF PENGGANTI TERIGU
Mutiara Ulfah, Eko Yuliastuti E.S., Athiefah Fauziyyah, Rina Rismaya, Dini Nur Hakiki, Mohamad Rajih Radiansyah
Tabel 1. Perbedaan Kondisi Metode Modifikasi dengan *Annealing* dan *Heat Moisture Treatment* 362
Tabel 2. Dampak Modifikasi Tepung Singkong pada Aplikasi Produk Pangan 367
Tabel 3. Proses dan Aplikasi Tepung Ubi Termodifikasi dengan Metode Fisik, Biologi, dan Kimia 371
Tabel 4. Hasil Modifikasi Tepung dan Pati Umbi *Discorea Spp.* 376

INOVASI PENGOLAHAN TALAS BENENG UNTUK MENDUKUNG KEBERAGAMAN KONSUMSI PANGAN MASYARAKAT 5.0
Ariyanti Hartari
Tabel 1. Kandungan Gizi Tepung Talas Beneng dengan Perlakuan *Pre-Cooked* 395
Tabel 2. Karakteristik Kimia Tepung Talas Beneng Produksi Gapoktan Juhut 397
Tabel 3. Komposisi Gizi/Nutrisi Brownies Formula Terpilih 398

POTENSI TANAMAN KELOR DALAM PERTANIAN BERKELANJUTAN DAN MANFAATNYA SEBAGAI MAKANAN SUPER
Rina Rismaya, Iffana Dani Maulida, Eko Yuliastuti Endah Sulistyawati, Dini Nur Hakiki, Athiefah Fauziyyah, Mutiara Ulfah, Mohamad Rajih Radiansyah
Tabel 1. Kandungan Gizi dan Serat Daun Segar dan Daun Kelor Kering (*Moringa oleifera*) 416

MEMINIMALKAN DAMPAK NEGATIF REVOLUSI HIJAU MELALUI PERTANIAN ORGANIK BERBASIS LIMBAH BIOMASSA KELAPA SAWIT DI PERKEBUNAN SAWIT PT. TEBO INDAH, JAMBI
Sri Listyarini, Guruh Sri Pamungkas
Tabel 1. Tabel 1. Luas Areal dan Produksi Kelapa Sawit Indonesia Tahun 2016-2021 488
Tabel 2. Kandungan Unsur Hara Limbah Tandan Kosong dari Pabrik Kelapa Sawit PT. Tebo Indah 494
Tabel 3. Kandungan Hara Cangkang Sawit 495
Tabel 4. Analisis Ketersediaan Limbah Biomassa 497
Tabel 5. Jenis dan Fungsi Mikroorganisme pada Dekomposer 502
Tabel 6. Analisis Biaya Pemupukan Kebun Kelapa Sawit 509

MODEL DINAMIKA *URBAN HEAT ISLAND* (UHI) BERDASARKAN TREN PENGGUNAAN LAHAN DI KOTA BALIKPAPAN, KALIMANTAN TIMUR
Mirza Permana, Guntur Bagus Pamungkas, Erika Pradana Putri, Ulul Hidayah
Tabel 1. Karakteristik Band/Spektral Data Landsat 8-OLI-TIRS dan 5-TM 522
Tabel 2. Perkembangan Penggunaan Lahan Terbangun dan Non Terbangun di Kota Balikpapan 524
Tabel 3. Perkembangan Penggunaan Lahan Terbangun dan Non Terbangun Per Kecamatan di Kota Balikpapan 526
Tabel 4. Tren Penggunaan Lahan di Kota Balikpapan 528
Tabel 5. Perbandingan Luas Lahan Terbangun dengan Rata-Rata Suhu Permukaan 535

KETERSEDIAAN EVAPOTRANSPIRASI MENGGUNAKAN SURFACE ENERGI BALANCE ALGORITHM FOR LAND DI TAMAN NASIONAL LORE LINDU PROVINSI SULAWESI TENGAH
Abdillah Munawir, Tania June, Cecep Kusmana, Yudi Setiawan
Tabel 1. Nilai Parameter Perhitungan Fluks Energi Tahun 2002, 2013, 2018 548
Tabel 2. Persentase Jumlah Radiasi Netto untuk Proses Fluks Uap Air 554
Tabel 3. Validasi Kinerja Sub Model Penduduk 556

PENGENDALIAN DEFORESTASI DI KABUPATEN BANJARNEGARA, PROVINSI JAWA TENGAH, INDONESIA: IMPLIKASINYA UNTUK MEMBANGUN EKONOMI HIJAU
Guntur Bagus Pamungkas, Anindya Putri Tamara, Galih Hendro Wijayanto
Tabel 1. Perubahan Luas Area Hutan Kabupaten Banjarnegara Tahun 2009-2022 Berdasarkan Analisis Perubahan Tutupan Lahan (LULCC) 571
Tabel 2. Perubahan Luas Kawasan Hutan Kabupaten Banjarnegara Tahun 2012-2018 berdasarkan Badan Pusat Statistik (BPS) 573

Tabel 3. Analisis LQ Kabupaten Banjarnegara Tahun 2017-2021 576
Tabel 4. Analisis Shift Share Kabupaten Banjarnegara Tahun 2017-2021 579
Tabel 5. Analisis Shift Share Kabupaten Banjarnegara Tahun 2017-2021 582

DINAMIKA SPASIAL PENAMBAHAN DARATAN SERTA KORELASINYA TERHADAP LUASAN MANGROVE DI DELTA CIMANUK KABUPATEN INDRAMAYU PROVINSI JAWA BARAT
Sodikin, Kusuma Lelana Ari Lestari, Fauzi Fahmi
Tabel 1. Jenis Mangrove di Delta Cimanuk Kabupaten Indramayu 610

PEMETAAN PARAMETER FISIK KIMIA MANGROVE DENGAN PEMANFAATAN SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS DI KAWASAN PESISIR INDRAMAYU
Lina Warlina, Agus Susanto, Sumartono, Sodikin
Tabel 1. Luas Mmangrove Tiap Kecamatan di Kabupaten Indramayu 631
Tabel 2. Nilai Salinitas 632
Tabel 3. Sebaran Fosfat 634
Tabel 4. Nilai Nitrat 637
Tabel 5. Nilai Timbal di Kabupaten Indramayu 640
Tabel 6. Nilai Klorin di Kabupaten Indramayu 643

PROGRAM BANDUNG HIJAU DAN BERSIH: PARADIGMA LINGKUNGAN DAN KEBIJAKAN PUBLIK DALAM PENGELOLAAN SAMPAH
A Hadian Pratama Hamzah, Nurhasanah, Sohifah
Tabel 1. Keterlibatan Masyarakat Dalam Perencanaan Program BGC Terkait Pengelolaan Sampah (n=83) 668
Tabel 2. Keterlibatan Masyarakat Dalam Pelaksanaan Program BGC Terkait Pengelolaan Sampah (n= 83) 668

Tabel 3. Keterlibatan Masyarakat Dalam Evaluasi Program BGC Terkait Pengelolaan Sampah (n= 83) 668

KEBUTUHAN KERETA API PENUMPANG PADA KORIDOR MANADO-BITUNG

Farisa Maulinam Amo

Tabel 1. Luas Mmangrove Tiap Kecamatan di Kabupaten Indramayu 695
Tabel 2. Crosstab Karakteristik Sosioekonomi terhadap Atribut Waktu Tempuh KA 697
Tabel 3. Crosstab Karakteristik Sosioekonomi terhadap Atribut Tarif..... 698
Tabel 4. Crosstab Karakteristik Pergerakan terhadap Atribut Frekuensi KA 700
Tabel 5. Crosstab Karakteristik Pergerakan terhadap Atribut Tarif 702
Tabel 6. Sensitivitas Jumlah Penumpang terhadap Perubahan Frekuensi KA 705
Tabel 7. Sensitivitas Perubahan Waktu Tempuh KA 707

PEMANFAATAN SUMBERDAYA PERIKANAN TUNA MADIDIHANG (*Thunnus albacares*) SECARA BERKELANJUTAN DI PERAIRAN TELUK BONE

Jalil, Achmar Mallawa, Faisal Amir, Safruddin

Tabel 1. Upaya Penangkapan, Produksi Tahunan, dan C/F di Perairan Teluk Bone..... 719
Tabel 2. Jumlah Upaya Penangkapan, Produksi, dan Indeks Musim Penangkapan di Perairan Teluk Bone Tahun 2018 725
Tabel 3. Hasil Analisis Aspek Biodinamika Populasi Ikan Tuna di Perairan Teluk Bone berdasarkan Stasiun 727

DAFTAR GAMBAR

PENGAMBILAN KEPUTUSAN MULTI KRITERIA MENGGUNAKAN *N-SOFT ROUGH SETS*
Fatia Fatimah

Gambar 1. Hasil Pemeringkatan Film oleh Pakar 37
Gambar 2. Peringkat Hotel pada Website www.trivago.co.uk 38
Gambar 3. Penilaian Konsumen pada Website www.amazon.com 39
Gambar 4. Penilaian Artikel oleh Reviewer pada Jurnal di IEEE 39

OPTIMASI MASALAH LOKASI FASILITAS DALAM RISET OPERASI DAN APLIKASINYA DI INDONESIA
Darsih Idayani

Gambar 1. Gambaran Umum Model Lokasi Fasilitas 74

PRODUK ASURANSI PERTANIAN INDEKS CURAH HUJAN UNTUK MENJAMIN KOMODITAS PERTANIAN DARI KASUS KEBANJIRAN
Siti Umamah Naili Muna

Gambar 1. Kurva Kepekatan Peluang Distribusi Burr Tipe XII (α,ξ,λ) dengan Parameter $\alpha,\xi,$ dan λ yang berbeda 105
Gambar 2. Kurva Kkepekatan Peluang Distribusi Mixture Gamma-2 Komponen $(p_1,\alpha_1,\alpha_2,\lambda_1,\lambda_2)$ dengan Parameter $p_1,\alpha_1,\alpha_2,\lambda_1$ dan yang Berbeda 108
Gambar 3. Model Klaim Benefit untuk Kasus Kekeringan 113
Gambar 4. Model Klaim Benefit untuk Kasus Kebanjiran 114
Gambar 5. Histogram Curah Hujan Harian Maksimum Periode Bulan September Sampai dengan Bulan Desember Tahun 1984 sampai dengan Tahun 2014 117
Gambar 6. Fungsi Kepekatan Peluang Burr tipe XII (Biru) dan Mixture Gamma-2 Komponen (Merah) terhadap Histogram Data Empirik 118

Gambar 7. Kurva Distribusi Kumulatif Empirik (Hitam) dan Distribusi Kumulatif a) Burr Tipe XII (Biru) dan b) Mixture Gamma-2 Komponen (Merah) 120

ANALISIS CLUSTER PROVINSI DI INDONESIA BERDASARKAN KONDISI KERUSAKAN DAN PERMUKAAN JALAN MENGGUNAKAN *METODE FUZZY C-MEANS*

Selly Anastassia Amellia Kharis, Muhammad Givari R

Gambar 1. Tahapan Penelitian Analisis Cluster Provinsi 132
Gambar 2. Koefisen Korelasi Pearson Jalan Nasional 138
Gambar 3. Koefisen Korelasi Pearson Jalan Provinsi 138
Gambar 4. Koefisen Korelasi Pearson Jalan Kabupaten 138
Gambar 5. Nilai Kontribusi Varians Masing-Masing PC terhadap Data Jalan Nasional 140
Gambar 6. Diagram *Scree Plot* Jalan Nasional 141
Gambar 7. Peta Kondisi dan Jenis Permukaan Jalan Nasional 142
Gambar 8. Peta Kondisi dan Jenis Permukaan Jalan Provinsi 144
Gambar 9. Peta Kondisi dan Jenis Permukaan Jalan Kabupaten 146

INTEGRAL HENSTOCK-KURZWEIL: INOVASI DALAM PERKEMBANGAN TEORI INTEGRAL DAN PENERAPANNYA PADA BEBERAPA MASALAH PERSAMAAN DIFERENSIAL

Elin Herlinawati

Gambar 1. Ilustrasi Integral Riemann 160
Gambar 2. Hubungan Antar Integral 166
Gambar 3. Galat Relatif untuk Diskritisasi 200 Titik 169
Gambar 4. Galat Relatif untuk Diskritisasi 400 170

REPRESENTASI TUNGGAL ALJABAR-C^* DARI GRAF BERARAH BARIS-BERHINGGA

Wahyu Hidayat

Gambar 1. (a) Contoh Graf Berarah Baris-Berhingga; (b) Contoh Bukan Graf Berarah Baris-Berhingga 188
Gambar 2. Graf Simpul Tunggal dengan 2 Loop 194

Gambar 3. Sebuah Lintasan dengan Panjang 2 dari Suatu Graf 198
Gambar 4. Lintasan dengan Panjang n dari Suatu Graf 198
Gambar 5. Fungsi Sumber dan Fungsi Hasil untuk Lintasan dari Suatu Graf *E* 199
Gambar 6. Lintasan Gabungan dari Suatu Graf *E* 199
Gambar 7. Graf Aturan Segitiga Vektor 204
Gambar 8. Graf yang Memuat Siklus 207

SURVEI PERSEPSI MINAT CALON MAHASISWA TERHADAP PROGRAM STUDI MANAJEMEN INFORMASI KESEHATAN DI UNIVERSITAS TERBUKA
Deddy Ahmad Suhardi, Sri Yuniati Putri Koes Hardini, Heny Kurniawati, Mutimanda Dwisatyadini, Sri Utami, Fawzi Rahmadiyan Zuhairi
Gambar 1. Distribusi Frekuensi Aspek-aspek Minat PS MIK ... 225
Gambar 2. Distribusi Frekuensi Aspek-Aspek Minat PS MIK Sistem PJJ 228
Gambar 3. Proyeksi Posisi setiap Variabel pada Dim 1 dan Dim 2: Korelasi ($\eta 2$) Variabel dengan Dua Dimensi Pertama MCA dari 28 Variabel Aktif 232
Gambar 4. Proyeksi Posisi Individual Partisipan (Kiri) dan Posisi Kategori Variabel (Kanan) pada Dim 1 dan Dim 2 234
Gambar 5. Proyeksi Posisi Kategori Variabel Provinsi (Kiri) dan Kategori Variabel Deskriptif Lainnya (Kanan) pada Dim 1 dan Dim 2 235

PENERAPAN ANALISIS FAKTOR DALAM MEMBENTUK FAKTOR LATEN YANG MEMENGARUHI KEPUASAN PESERTA DIDIK MATAKULIAH KIMIA DASAR TERHADAP VIDEO PEMBELAJARAN INTERAKTIF
Siti Hadijah Hasanah, Adhi Susilo, Sigit Supriyadi
Gambar 1. Diagram Alir Analisis Faktor 260
Gambar 2. Statistika Deskriptif Peserta Didik Berdasarkan Prodi dan Usia 261

Gambar 3. Distribusi Frekuensi Respon Peserta Didik Terhadap Video Interaktif Mata Kuliah Kimia Dasar (KIMD4110) 263
Gambar 4. *Scree Plot* 268

INOVASI PENGOLAHAN TALAS BENENG UNTUK MENDUKUNG KEBERAGAMAN KONSUMSI PANGAN MASYARAKAT 5.0
Ariyanti Hartari
Gambar 1. Proses Pembuatan Tepung Talas Beneng di Gapoktan Juhut 396

POTENSI TANAMAN KELOR DALAM PERTANIAN BERKELANJUTAN DAN MANFAATNYA SEBAGAI MAKANAN SUPER
Rina Rismaya, Iffana Dani Maulida, Eko Yuliastuti Endah Sulistyawati, Dini Nur Hakiki, Athiefah Fauziyyah, Mutiara Ulfah, Mohamad Rajih Radiansyah
Gambar 1.a Daun Kelor Segar dengan Tangkai 416
Gambar 1.b Tepung Daun Kelor 416

PENDIDIKAN KEWIRAUSAHAAN PRODUK PANGAN: STUDI KASUS DI PRODI TEKNOLOGI PANGAN UNIVERSITAS TERBUKA
Adhi Susilo dan Sazli Tutur Risyahadi
Gambar 1. Distribusi Frekuensi Respon Setiap Butir Evaluasi Tutor Tuton 441
Gambar 2. Contoh Daftar Mahasiswa Per Kelas Tuton PANG4417 445
Gambar 3. Aktivitas Webinar MataKuliah PANG 4417 446
Gambar 4. Aktivitas Webinar MataKuliah PANG 4417 447

KONSERVASI LAHAN BEKAS GALIAN C UNTUK LAHAN PERTANIAN
Nurmala Pangaribuan, Sri Maulidia Permatasari
Gambar 1. Lahan Galian C di Tasikmalaya .....
Gambar 2. Lahan Galian C di Karangasem 463
463

MEMINIMALKAN DAMPAK NEGATIF REVOLUSI HIJAU MELALUI PERTANIAN ORGANIK BERBASIS LIMBAH BIOMASSA KELAPA SAWIT DI PERKEBUNAN SAWIT PT. TEBO INDAH, JAMBI

Sri Listyarini, Guruh Sri Pamungkas

Gambar 1. Indonesia Produsen Terbesar Minyak Kelapa Sawit Dunia 487
Gambar 2. Diagram Alir Proses Pengolahan Kelapa Sawit 491
Gambar 3. Limbah Biomassa Kelapa Sawit pada PT. Tebo Indah 492
Gambar 4. Gunungan Limbah Biomassa Kelapa Sawit di PT. Tebo Indah 498
Gambar 5.a. Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebelum dan Sesudah Dicacah 499
Gambar 5.b. Pelepah Kering Sebelum dan Sesudah Dicacah 500
Gambar 5.c. Pelepah Hijau Kelapa Sawit Sebelum dan Sesudah Dicacah 500
Gambar 6. Pelepah Hijau Cacah Sebelum dan Sesudah Dekomposis 503
Gambar 7. Pelepah Kering Cacah Sebelum dan Sesudah Dekomposisi 504
Gambar 8. Tandan Kosong Cacah Sebelum dan Sesudah Dekomposisi 505
Gambar 9. Campuran Pelepah Hijau, Pelepah Kering, dan Tandan Kosong Sebelum dan Sesudah Dekomposisi 506

MODEL DINAMIKA *URBAN HEAT ISLAND* (UHI) BERDASARKAN TREN PENGGUNAAN LAHAN DI KOTA BALIKPAPAN, KALIMANTAN TIMUR

Mirza Permana, Guntur Bagus Pamungkas, Erika Pradana Putri, Ulul Hidayah

Gambar 1. Peta Administratif Kota Balikpapan 518
Gambar 2. Konsep Penginderaan Jauh (Spatio Temporal – LULC) Menggunakan QGIS 523

Gambar 3. Perbandingan Penggunaan Lahan di Kota Balikpapan Tahun 2004, 2013, dan 2020 524
Gambar 4. Sebaran Spasial Tren Penggunaan Lahan di Kota Balikpapan Tahun 2004, 2013, dan 2020 530
Gambar 5. Jaringan Transportasi Regional Kalimantan Timur dimana Kota Balikpapan sebagai Gerbangnya 531
Gambar 6. Kawasan Industri di Kalimantan Timur dimana Kota Balikpapan sebagai *Outlet*-nya 531
Gambar 7. Peta Sebaran Lahan Terbangun dan Non Terbangun di Kota Balikpapan 532
Gambar 8. Metode Penginderaan Jauh Spatio Temporal – *land surface temperature* (LST) Menggunakan QGIS 534
Gambar 9. Peta Perubahan Land Surface Temperature (LST) Tahun 2004-2020 536
Gambar 10. Perbandingan Land Surface Temperature (LST) Kota Balikpapan dengan Kota Surabaya dan Kota Samarinda Tahun 2021 537

KETERSEDIAAN EVAPOTRANSPIRASI MENGGUNAKAN *SURFACE ENERGI BALANCE ALGORITHM FOR LAND* DI TAMAN NASIONAL LORE LINDU PROVINSI SULAWESI TENGAH
Abdillah Munawir, Tania June, Cecep Kusmana, Yudi Setiawan
Gambar 1. Hubungan Ln (Zo)-NDVI/Albedo 2002, 2013, 2018 553
Gambar 2. Skenario Tutupan Lahan Hutan (A) dan Skenario Penduduk (B), Hutan dan Suhu (C) 555
Gambar 3. Grafik Pengujian Validitas Struktur Model (Pertambahan Penduduk Diikuti dengan Penurunan Laju Tutupan Lahan Hutan) 556
Gambar 4. Grafik Simulasi Skenario Penduduk 557

PENGENDALIAN DEFORESTASI DI KABUPATEN BANJARNEGARA, PROVINSI JAWA TENGAH, INDONESIA: IMPLIKASINYA UNTUK MEMBANGUN EKONOMI HIJAU

Guntur Bagus Pamungkas, Anindya Putri Tamara, Galih Hendro Wijayanto

Gambar 1. Peta Administrasi Kabupaten Banjarnegara 569
Gambar 2. Peta Tutupan Lahan (LULC) Kabupaten Banjarnegara Tahun 2009 572
Gambar 3. Peta Tutupan Lahan (LULC) Kabupaten Banjarnegara Tahun 2015 572
Gambar 4. Peta Tutupan Lahan (LULC) Kabupaten Banjarnegara Tahun 2022 574
Gambar 5. Prioritas Pengembangan Ekonomi di Kabupaten Banjarnegara 586
Gambar 6. Rencana Pengembangan Ekonomi di Kabupaten Banjarnegara 587

DINAMIKA SPASIAL PENAMBAHAN DARATAN SERTA KORELASINYA TERHADAP LUASAN MANGROVE DI DELTA CIMANUK KABUPATEN INDRAMAYU PROVINSI JAWA BARAT

Sodikin, Kusuma Lelana Ari Lestari, Fauzi Fahmi

Gambar 1. Bentuk Delta Kaki Burung (*lobben*) dan Delta Mahakam 598
Gambar 2. Bentuk Delta Tumpul 599
Gambar 3. Bentuk Delta Runcing 599
Gambar 4. Bentuk Delta Estuaria 600
Gambar 5. Lokasi Penelitian 604
Gambar 6. Peta Administrasi Kabupaten Indramayu 606
Gambar 7. Peta Daerah Aliran Sungai (DAS) Cimanuk 607
Gambar 8. Perubahan Garis Pantai (a) Tahun 1991 (b) Tahun 1996 (c) Tahun 2006 (d) Tahun 2021 dan (e) Overlay Garis Pantai Tahun 1991,1996, 2006 dan 2021..... 608
Gambar 9. Grafik Luasan Delta Cimanuk Tahun 1991-2021 609
Gambar 10. Grafik Penambahan Luasan Mangrove Tahun 1995 -2021 611

Gambar 11.a. *Trend* Spasial Penambahan daratan dan mangrove di Delta Cimanuk pada periode tahun 1991, 1996, 2006, dan 2021 613
Gambar 11.b. *Trend* Spasial Penambahan Daratan dan Mangrove di Delta Cimanuk 614
Gambar 12. Penambahan Daratan dan Mangrove di Muara Sungai Cimanuk Kabupaten Indramayu Rentang Tahun 1991-2021 614

PEMETAAN PARAMETER FISIK KIMIA MANGROVE DENGAN PEMANFAATAN SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS DI KAWASAN PESISIR INDRAMAYU

Lina Warlina, Agus Susanto, Sumartono, Sodikin

Gambar 1. Peta Penyebaran Mangrove Tahun 1989, 2002, dan 2015 629
Gambar 2. Grafik Perubahan Luas Mangrove di Kabupaten Indramayu Tahun 1989, 2002, dan 2015 630
Gambar 3. Peta Sebaran Salinitas 633
Gambar 4. Peta sebaran Fosfat di Kabupaten Indramayu 636
Gambar 5. Peta Sebaran Nitrat di Kabupaten Indramayu 639
Gambar 6. Peta Sebaran Timbal di Kabupaten Indramayu 642
Gambar 7. Sebaran Klorin di Kabupaten Indramayu 645

KEBUTUHAN KERETA API PENUMPANG PADA KORIDOR MANADO-BITUNG

Farisa Maulinam Amo

Gambar 1. Pusat-Pusat Kegiatan di Provinsi Sulawesi Utara 683
Gambar 2. Kawasan dengan Kegiatan Ekonomi di Provinsi Sulawesi Utara 685
Gambar 3. Kesediaan Menggunakan angkutan KA 688
Gambar 4. Preferensi terhadap Tingkat Keamanan dan Kenyamanan 689

Gambar 5. Preferensi Penumpang Potensial terhadap Bentuk Kenyamanan 690
Gambar 6. Preferensi terhadap Konektivitas Menuju Stasiun 691
Gambar 7. Preferensi Penumpang Potensial Terhadap Menuju Stasiun Akhir 691
Gambar 8. Preferensi Penumpang Potensial terhadap Frekuensi KA 692
Gambar 9. Preferensi Penumpang Potensial terhadap Waktu Tempuh 693
Gambar 10. Preferensi Penumpang Potensial terhadap Kesediaan Membayar 694
Gambar 11. Sensitivitas Penggunaan KA berdasarkan Preferensi Frekuensi KA 704
Gambar 12. Sensitivitas Perubahan Jumlah Penumpang terhadap Waktu Tempuh 706
Gambar 13. Sensitivitas Jumlah Penumpang terhadap Perubahan Tarif 708

PEMANFAATAN SUMBERDAYA PERIKANAN TUNA MADIDIHANG (*Thunnus albacares*) SECARA BERKELANJUTAN DI PERAIRAN TELUK BONE

Jalil, Achmar Mallawa, Faisal Amir, Safruddin

Gambar 1. Lokasi Penelitian dan Stasiun Pengambilan Sampel di Perairan Teluk Bone 718
Gambar 2. Perbandingan antara Produksi Hasil Angkapan Aktual, MSY 719
Gambar 3. Ukuran Ikan Pertama Kali Tertangkap di Perairan Teluk Bone yang Mendarat pada Masing-Masing Stasiun. (A) Stasiun 1 (Utara) Dan (B) Stasiun 2 (Selatan) 723

Accelerating Sustainable Innovation Towards Society 5.0

Kemajuan inovasi dalam bidang sains dan teknologi terus bertumbuh secara cepat dan membawa perubahan yang signifikan bagi kehidupan manusia. Di awal peradapan, manusia berada pada masa yang sepenuhnya bergantung pada alam dengan cara berpindah-pindah, berburu dan meramu. Kemudian manusia mulai fokus untuk mengembangkan ilmu dan pengetahuan dengan cara menetap dan membangun masyarakat yang lebih kompleks dengan era pertanian atau revolusi agrikultur. Pada abad ke-18, penemuan mesin uap menandai adanya revolusi industri yaitu terjadi perubahan besar pada cara manusia mengelola sumber daya menjadi tidak tergantung sepenuhnya dengan tenaga manusia namun pada mesin-mesin industri. Semakin lama pengetahuan dan teknologi menjadi semakin berkembang hingga saat ini telah berada dalam suatu era dimana perkembangan teknologi *internet of things, artificial intelligent, dan robotic* membawa perubahan di berbagai lini kehidupan yang dikenal dengan society 4.0. Pada masa society 4.0 teknologi informasi dan digitalisasi berkembang sangat cepat membuat masyarakat dapat mengakses basis data (database) di dunia maya. Selanjutnya dengan dukungan jaringan, manusia mengumpulkan berbagai informasi dan menganalisisnya untuk dapat memanfaatkannya.

Akses teknologi informasi yang begitu cepat, membuat kehidupan manusia seperti tidak memiliki jarak ruang dan waktu. Kondisi ini juga menimbulkan sejumlah masalah akibat dari manusia yang terdegradasi oleh mesin atau teknologi. Oleh karena itu, sangat penting untuk memanfaatkan teknologi sepenuhnya dengan menciptakan nilai-nilai baru, yaitu membuat hubungan antara "orang dan benda" dan antara dunia "nyata dan dunia maya", sebagai sarana yang efektif dan efisien untuk menciptakan kehidupan yang lebih baik bagi masyarakat serta mempertahankan pertumbuhan ekonomi yang sehat (Fukuyama, 2018). Konsep ini merupakan konsep dari society 5.0 atau *super smart society,* masyarakat super cerdas yang dikenalkan pertama kali oleh pemerintah Jepang. Melalui society 5.0, teknologi dikembangkan dengan mengintegrasikan konsep

otomatisasi/digitalisasi dengan humanisasi. Konsep society 5.0 ini sejalan dengan tujuan pembangunan berkelanjutan '*Sustainable Development Goals*' (SDGs) dimana semua negara bekerja sama menuju pencapaian pembangunan ekonomi tanpa mengesampingkan permasalahan sosial. Prinsip pembangunan berkelanjutan ini adalah perdamaian dan kemakmuran bagi semua orang secara inklusif dengan "tidak meninggalkan siapa pun".

Percepatan inovasi yang berkelanjutan dibutuhkan untuk mewujudkan perkembangan sains dan teknologi yang sesuai dengan tujuan pembangunan yang berkelanjutan, khususnya menuju era society 5.0. Inovasi yang berkelanjutan merupakan inovasi-inovasi yang memiliki sifat berkelanjutan dengan memberikan dampak tidak hanya pada aspek ekonomi namun juga memperhatikan aspek sosial dan lingkungan. Inovasi yang berkelanjutan tidak hanya memikirkan keuntungan semata-mata namun juga bagaimana manfaat dari inovasi yang dihasilkan dalam jangka waktu yang lama. Dengan inovasi yang berkelanjutan, teknologi yang dihasilkan dapat menjadi lebih kompetitif karena memaksimalkan penggunaan sumber daya yang sudah ada, lebih dapat survive (bertahan) karena memiliki orientasi jangka panjang, dan memunculkan teknologi baru lagi yang lebih baik lagi (Lee, 2021). Percepatan inovasi berkelanjutan dapat terwujud melalui peran serta berbagai *stake holder,* sehingga pemanfaatan teknologi dapat mencapai society 5.0.

Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Terbuka (FST UT) berkontribusi dalam pengembangan inovasi berkelanjutan melalui berbagai bentuk kajian ilmiah di bidang sains dan teknologi, antara lain diwujudkan dalam buku berjudul ***Accelerating Sustainable Innovation towards Society 5.0***. Pada buku ini, sejumlah dosen dari 9 program studi di FST UT mendiseminasikan hasil penelitian, pemikiran, ide/gagasan, serta reviu literatur dalam bentuk 26 tulisan ilmiah. Sesuai dengan bidang ilmu yang dikembangkan dalam 9 program studi, fokus kajian tulisan ilmiah dikelompokan dalam 3 (tiga) topik yaitu *Science and Mathematics for Innovation*, *Sustainable Food and Agriculture*, dan *Environmental and Sustainable Development*. Lima puluh tujuh dosen menuangkan buah pikirannya melalui penulisan karya ilmiah berkolaborasi sesama dosen FST UT, maupun berkolaborasi dengan dosen dari perguruan tinggi lain

Salah satu karakteristik masyarakat society 5.0 adalah pemanfaatan teknologi yang dapat mentransformasi dan mengintegrasikan dunia nyata dan dunia virtual. Tulisan **Fitria Amastini, Dwinanda Suci Sekarhati, dan Dwi Astuti Aprijani** membahas inovasi teknologi *Extended Reality* yang dapat digunakan dalam pembelajaran di Perguruan Tinggi Indonesia. Teknologi ini diperlukan untuk mengatasi permasalahan dalam pembelajaran jarak jauh dengan memberikan pengalaman belajar yang menarik dan membangun kedekatan emosional dengan menggabungkan wujud fisik dan virtual sebagai bagian dari dunia metaverse. Selanjutnya Inovasi teknologi akan lekat dengan pengambilan keputusan yang melibatkan data yang tidak pasti *(uncertainty).* Pengambilan keputusan multi kriteria menggunakan *N-Soft Rough Sets* dibahas dalam artikel **Fatia Fatimah** yang dapat diaplikasikan dalam pengambilan keputusan dan pemanfaatan big data dalam berbagai sektor kehidupan di masyarakat. Lebih lanjut pengambilan keputusan untuk menyelesaikan permasalahan pemilihan lokasi fasilitas di Indonesia sebagai inovasi yang berkelanjutan dibahas dalam artikel **Darsih Idayani**. Pengambilan keputusan dalam mewujudkan pemerataan infrastruktur jalan di Indonesia dibahas oleh **Selly Anastassia Amellia Kharis dan Muhamad Givari Ramdhani** dalam analisis cluster provinsi di Indonesia berdasarkan kondisi kerusakan jalan menggunakan metode Fuzzy C-Means. Artikel **Siti Umamah Naili Muna** menyoroti permasalahan ketidakpastian pada sektor pertanian akibat perubahan iklim, dengan inovasi produk asuransi pertanian. Pengembangan inovasi teknologi tidak lepas dari peran matematika; **Elin Herlinawati** membahas mengenai penelitian matematika analisis tentang teori perkembangan integral Henstock-Kurzweil yang dapat menjadi dasar penerapan teknologi dalam mendukung ketercapaian tujuan dari masyarakat 5.0. Kemudian, **Wahyu Hidayat** membahas mekanika kuantum tentang Aljabar C dari graf berarah baris-berhingga yang dapat dimanfaatkan untuk pengembangan *artificial intelligence*. Big data dapat dimanfaatkan untuk mengidentifikasi prospek minat calon mahasiswa dalam pembukaan program studi baru menggunakan *multiple correspondence analysis* (MCA), dibahas oleh **Deddy Ahmad Suhardi, Sri Yuniati Putri Koes Hardini, Heny Kurniawati, Mutimanda Dwisatyadini, Sri Utami,**

dan Fawzi Rahmadiyan Zuhairi. Analisis persepsi peserta didik terhadap video pembelajaran interaktif sebagai masukan dalam pengembangan inovasi media pembelajaran online di perguruan tinggi, dibahas oleh **Siti Hadijah Hasanah, Adhi Susilo, dan Sigit Supriyadi**.

Selaras dengan society 5.0 yang menyeimbangkan antara perkembangan ekonomi (kebutuhan pangan) dengan resolusi permasalahan sosial (seperti dampak terhadap lingkungan dan kualitas sumber daya manusia), maka dalam bidang penyediaan pangan, konsep keberlanjutan dilakukan dengan memaksimalkan hasil produksi (output) dan juga dengan meminimalisir kehilangan. **Dini Nur Hakiki, M. Rajih Radiansyah, Eko Yuliastuti E.S., Athiefah Fauziyyah, Rina Rismaya, Mutiara Ulfah, dan Rozana** dalam tulisannya menjelaskan tentang kehilangan yang terjadi pada komoditas buah dan sayur serta inovasi yang dibutuhkan dalam penanganan dan teknologi pascapanen untuk mengurangi kehilangan pangan tersebut. Selanjutnya pangan yang dikonsumsi tidak hanya lezat, bergizi, dan aman namun dalam konsep pangan 5.0 menuntut juga aspek kesehatan, ketenangan pikiran, keadilan perdagangan, dan bebas dari beban lingkungan. Konsep ini dikaji melalui tulisan oleh **Athiefah Fauziyyah, Eko Yuliastuti, Dini Nur Hakiki, M Rajih Radiansyah, Rina Rismaya, dan Mutiara Ulfah.** Kemudian, ketergantungan konsumsi pangan pada satu komoditas dapat mengancam ketahanan pangan sehingga perlu dicari alternatif sumber karbohidrat pengganti beras dan gandum. Komoditas umbi-umbian mengandung karbohidrat yang cukup baik untuk digunakan sebagai alternatif sumber karbohidrat selain beras dan gandum dijelaskan dalam artikel **Eko Yuliastuti Endah Sulistyawati, Athiefah Fauziyyah, Dini Nur Hakiki, Mohamad Rajih Radiansyah, Rina Rismaya, dan Mutiara Ulfah**. Artikel yang ditulis **Mutiara Ulfah, Eko Yuliastuti E. S., Athiefah Fauziyyah, Rina Rismaya, Dini Nur Hakiki, dan Mohamad Rajih Radiansyah** menjelaskan berbagai inovasi untuk meningkatkan kualitas dan sifat fungsional tepung umbi-umbian yang dapat mendekati karakteristik tepung terigu, sesuai dengan permintaan industri, dan dapat dimanfaatkan oleh masyarakat. Selanjutnya, dukungan terhadap terwujudnya society 5.0 dapat dilakukan dengan menggali potensi komoditas lokal. Berbagai inovasi terkait pemanfaatan komoditas lokal didukung pemanfaatan

inovasi teknologi yang tepat, dapat berujung pada peningkatan perekonomian masyarakat setempat. **Ariyanti Hartari** membahas komoditas lokal dari Banten yaitu talas beneng. Komoditas ini memiliki potensi sebagai pangan lokal yang yang dapat diolah menjadi berbagai produk pangan melalui inovasi berkelanjutan untuk mendukung ketahanan pangan. **Rina Rismaya, Iffana Dani Maulida, Eko Yuliastuti Endah Sulistyawati, Dini Nur Hakiki, Athiefah Fauziyyah, Mutiara Ulfah, dan Mohamad Rajih Radiansyah** membahas kelor, tanaman yang tumbuh dengan baik di seluruh bagian wilayah di Indonesia. Dalam artikel ini dibahas perkembangan riset mengenai potensi ekonomi tanaman kelor, nilai gizi, serta manfaatnya terhadap kesehatan;sehingga diharapkan dapat dilakukan upaya budidaya secara berkelanjutan dan dimanfaatkan secara optimal oleh masyarakat Indonesia. **Adhi Susilo dan Sazli Tutur Risyahadi,** dalam artikelnya membahas dukungan terhadap pangan yang berkelanjutan melalui penyediaan pendidikan kewirausahaan produk pangan di tingkat perguruan tinggi, sehingga dapat mencetak sumber daya manusia yang memiliki kemampuan untuk menghasilkan inovasi-inovasi terbaru, adaptif, dan solutif dalam menyelesaikan permasalahan di bidang pangan. Kemudian, sistem pertanian yang berkelanjutan dengan memanfaatkan lahan bekas tambang galian C sebagai lahan produktif pertanian dibahas dalam artikel **Nurmala Pangaribuan dan Sri Maulidia Permatasari.** Pendekatan dalam pengelolaan lahan bekas tambang dengan mengadopsi teknologi ramah lingkungan, revegetasi, fitoremediasi, pemberian bahan organik dan mikro organisme tanah diharapkan mampu meningkatkan ketersediaan lahan yang favorable sebagai lahan pertanian untuk mendukung pemenuhan kebutuhan pangan

Pengembangan inovasi teknologi juga harus sejalan dengan prinsip-rinsip keseimbangan lingkungan dan pembangunan yang berkelanjutan yaitu pembangunan yang memenuhi kebutuhan generasi sekarang tanpa mengorbankan potensi kualitas hidup untuk generasi mendatang. **Sri Listyarini dan Guruh Sri Pamungkas** membahas mengenai pemanfaatan limbah biomassa kelapa sawit berupa pelepah dan tandan kosong sawit sebagai pupuk organik di perkebunana sawit PT. Tebo Indah. Pupuk ini dapat meminimalkan ketergantungan pada penggunaan pupuk kimia dan mengurangi timbulan

limbah biomassa yang dapat merusak lingkungan. Upaya lain untuk meningkatkan kualitas hidup secara berkelanjutan sebagai bagian dari society 5.0 adalah peningkatan ruang hidup masyarakat melalui pengembangan kota berbasis smart city. **Mirza Permana, Guntur Bagus Pamungkas, Erika Pradana Putri, dan Ulul Hidayah** menganalisis tren perubahan penggunaan lahan dan hubungannya dengan tren kenaikan suhu permukiman di Kota Balikpapan. Fenomena kenaikan suhu perkotaan perlu dicermati dengan seksama sehingga dapat menghasilkan strategi yang tepat guna menciptakan lingkungan perkotaan yang berkelanjutan, aman, nyaman dan produktif menuju masyarakat 5.0. **Farisa Maulinam Amo** juga membahas mengenai perencanaan transportasi kereta api untuk mewujudkan pengembangan pusat pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan dengan mengkaji preferensi calon penumpang terhadap bentuk pelayanan kereta api koridor Manado Bitung.

Peralihan penggunaan lahan menjadi lahan untuk perkebunan, pertanian, dan pemukiman di kawasan konservasi dapat mengancam keanekaragaman hayati. **Abdillah Munawir, Tania June, Cecep Kusmana, dan Yudi Setiawan** mengidentifikasi estimasi fluks energi dan evapotranspirasi yang berpengaruh terhadap laju deplesi tutupan lahan hutan dan membangun model ketersediaan evapotranspirasi beberapa tahun ke depan; sehingga diharapkan fungsi kawasan konservasi dan keanekaragaman hayati dapat terjaga dengan baik. **Sodikin, Kusuma Lelana Ari Lestari, dan Fauzi Fahmi** mengamati perubaan wilayah pesisir yang jika berlangsung terus menerus akan berdampak terhadap ekosistem mangrove yang menjadi penyeimbang di wilayah pesisir. **Lina Warlina, Agus Susanto, Sumartono, dan Sodikin** juga meneliti mengenai ekosistem mangrove. Dalam tulisan ini dilakukan pemetaan spasial menggunakan sistem informasi geografis (GIS) terhadap ekosistem magrove yang tercemar limbah domestik dari rumah tangga maupun industri. Pemetaan ini bertujuan untuk mengendalikan pencemaran secara detail sehingga penanganan limbahnya dapat dilakukan secara optimal. Selanjutnya pengelolaan lingkungan menjadi suatu masalah yang harus diselesaikan bersama secara lintas sektoral. **A Hadian Pratama Hamzah, Nurhasanah, dan Sohifah** membahas faktor-

faktor yang mempengaruhi keberhasilan maupun kegagalan pelaksanaan program pengelolaan sampah di Bandung, yang dapat menjadi gambaran pengelolaan lingkungan pada kota-kota besar. Terakhir, pemanfaatan sumber daya alam harus sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan agar tetap lestari dan dapat dinikmati oleh generasi mendatang. **Jalil, Achmar Mallawa, Faisal Amir, dan Safruddin** menganalisis aspek perikanan Tuna Madidihang untuk pemanfaatan secara berkelanjutan di Perairan Teluk Bone. Dalam artikel ini dibahas laju eksplotasi tuna yang bila melebihi batas dapat mengancam kelestarian sumber daya ikan tuna di Teluk Bone.

Sebagai penutup, kontribusi buku ini masih berupa sebuah puzzle kecil yang akan berkontribusi dalam potret besar percepatan inovasi berkelanjutan untuk mewujudkan society 5.0. Percepatan inovasi yang berkelanjutan perlu diupayakan secara konsisten dan dilakukan berbagai stake holder secara simultan. Kolaborasi dan sinergi antar beberapa pihak baik dari pihak akademisi, pemerintah, industri atau praktisi, dan masyarakat perlu dilakukan. Demikian juga, penerapan hasil pengembangan sains dan teknologi perlu diuji secara terus menerus untuk mencapai inovasi yang dapat dimanfaatkan masyarakat untuk hidup sejahtera, aman, nyaman, dan bahagia tidak hanya untuk kita saat ini namun juga untuk generasi kita yang akan datang.

Tim Editor

DAFTAR PUSTAKA

Fukuyama, M. (2018). Society 5:0: Aiming for new human centred society. Retrieved from https://www.jef.or.jp/journal/pdf/220th_Special_Article_02.pdf

Lee, J.Y. (2021). What's sustainable innovation?. Retrieved from https://nbs.net/what-is-sustainable-innovation-and-how-to-make-innovation-sustainable/

01

SCIENCE AND MATHEMATICS FOR INNOVATION

TOPICS:

Computer Science
Innovation Technology
Pure and Applied Mathematics
Statistics
Metaverse

01 SCIENCE AND MATHEMATICS FOR INNOVATION

Fitria Amastini, Dwinanda Suci Sekarhati, Dwi Astuti Aprijani

Implikasi Inovasi *Extended Reality* di Perguruan Tinggi Indonesia terhadap *Metaverse*

Fatia Fatimah

Pengambilan Keputusan Multi Kriteria Menggunakan *N-Soft Rough Sets*

Darsih Idayani

Optimasi Masalah Lokasi Fasilitas dalam Riset Operasi dan Aplikasinya di Indonesia

Siti Umamah Naili Muna

Produk Asuransi Pertanian Indeks Curah Hujan untuk Menjamin Komoditas Pertanian dari Kasus Kebanjiran

Selly Anastassia Amellia Kharis, Muhammad Givari Ramdhani

Analisis Cluster Provinsi di Indonesia Berdasarkan Kondisi Kerusakan dan Permukaan Jalan Menggunakan Metode *Fuzzy C-Means*

Elin Herlinawati

Integral Henstock-Kurzweil: Inovasi dalam Perkembangan Teori Integral Dan Penerapannya pada Beberapa Masalah Persamaan Diferensial

Wahyu Hidayat

Representasi Tunggal Aljabar-C^* dari Graf Berarah Baris-Berhingga

Deddy Ahmad Suhardi, Sri Yuniati Putri Koes Hardini, Heny Kurniawati, Mutimanda Dwisatyadini, Sri Utami, Fawzi Rahmadiyan Zuhairi

Survei Persepsi Minat Calon Mahasiswa terhadap Program Studi Manajemen Informasi Kesehatan di Universitas Terbuka

Siti Hadijah Hasanah, Adhi Susilo, Sigit Supriyadi

Penerapan Analisis Faktor dalam Mengidentifikasi faktor-faktor yang Mempengaruhi Kepuasan Peserta Didik Kimia Dasar terhadap Video Pembelajaran Interaktif

IMPLIKASI INOVASI *EXTENDED REALITY* DI PERGURUAN TINGGI INDONESIA TERHADAP *METAVERSE*

THE IMPLICATIONS OF EXTENDED REALITY INNOVATION IN INDONESIA'S HIGHER EDUCATION TOWARDS METAVERSE

Fitria Amastini[1*], Dwinanda Suci Sekarhati[2], Dwi Astuti Aprijani[1]

[1]Program Studi Sistem Informasi Jurusan Teknik, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
[2]Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Bina Nusantara

*amas@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Metaverse menjadi tren topik inovasi yang diteliti dalam bidang teknologi, meskipun teknologi yang digunakan metaverse tidak asing, yaitu teknologi imersif extended reality (XR) seperti virtual reality (VR), augmented reality (AR), dan mixed reality (MR). Sejak-pandemi Covid-19, terjadi pergeseran di perguruan tinggi yang awalnya melakukan pembelajaran tatap muka beralih ke pembelajaran daring. Walaupun sudah ada e-learning, belum ada solusi permasalahan untuk menciptakan pembelajaran yang interaktif, menarik, dan membangun keterlibatan dan kedekatan emosional. Tujuan dari penelitian ini adalah memberikan perbandingan penerapan teknologi XR yang ada di luar negeri dan Indonesia, dan memberikan rekomendasi untuk peningkatan teknologi XR di Indonesia. Berdasarkan peluang yang dihadirkan oleh teknologi XR di sektor pendidikan tinggi, diperlukan pengkajian lebih lanjut tentang penelitian pengembangan teknologi XR di bidang pendidikan untuk melihat implikasi inovasi XR menuju metaverse. Metode yang digunakan adalah systematic literature review. Hasil kajian dari 47 paper menunjukkan bahwa Indonesia lebih banyak menerapkan teknologi VR dan AR dibandingkan XR dan MR. Pada tahap awal, Indonesia dapat menerapkan penggunaan platform seperti Thinglink, HoloLens, Sketchup, dan lainnya. Selain itu, Indonesia juga dapat memanfaatkan peluang dan mengatasi tantangan

dari implementasi XR dengan meningkatkan kemampuan teknologi pembelajaran berbasis inkuiri, keamanan, jaringan, perangkat keras, dan biaya, sehingga Indonesia dapat menuju era Metaverse yang menekan aspek sosial dan kolaborasi dalam konteks pendidikan tinggi.

Kata Kunci: *augmented reality, extended reality, metaverse, mixed reality, perguruan tinggi, virtual reality*

ABSTRACT

Metaverse has become a trending topic of innovation researched in the technology field, although the technology used by Metaverse is familiar, namely immersive extended reality (XR) technology such as virtual reality (VR), augmented reality (AR), and mixed reality (MR). Since the Covid-19 pandemic, there has been a shift in universities that formerly carried out face-to-face learning to online learning. Even though e-learning has been implemented, there is no solution to create interesting and interactive learning, and build emotional involvement and closeness. The purpose of this study is to compare the development of XR technology outside Indonesia and in Indonesia and provide recommendations for improving XR technology in Indonesia. Based on the opportunities presented by XR technology in the higher education sector, further studies on the development of XR technology in the field of education are needed to see the implications related to XR innovation towards the metaverse. Method used is systematic literature review method. The results of a study of 47 papers show that Indonesia applies VR and AR technology more than XR and MR. In the early stages, Indonesia can implement the use of platforms such as Thinglink, HoloLens, Sketchup, and others. In addition, Indonesia can also take advantage of opportunities and overcome the challenges of implementing XR by increasing the capabilities of inquiry-based learning technology, security, networks, hardware, and costs so that Indonesia can move towards the Metaverse era which emphasizes social and collaboration aspects in the context of higher education.

Keywords: *augmented reality, extended reality, metaverse, mixed reality, higher education, virtual reality.*

PENDAHULUAN

Metaverse menjadi topik yang semakin diperbincangkan semenjak Facebook mengubah namanya menjadi Meta Platforms Inc. Pada Oktober 2021, istilah dan teknologi terkait *metaverse* bukanlah hal yang asing. *Metaverse* adalah suatu dunia yang menggabungkan wujud fisik di dunia nyata dengan wujud virtual di dunia virtual dengan mengkonvergensikan teknologi yang memberikan pengalaman imersif ke multi-pengguna (Mystakidis, 2022). Untuk membangun dunia *metaverse*, dibutuhkan teknologi yang mentransformasi dan mengintegrasikan dunia nyata dan dunia virtual, seperti *virtual reality* (VR), *augmented reality* (AR), dan *mixed reality* (MR), serta teknologi tingkat teratasnya disebut *extended reality* (XR). Hal ini didasari dari keinginan manusia untuk menyatukan dunia virtual, yang direpresentasikan sebagai *metaverse*, dengan dunia nyata ke dalam bentuk dunia alternatif untuk mewadahi hal-hal yang tidak dapat dicapai di dunia nyata (Jeon, Youn, Ko, & Kim, 2022).

Penyebaran Covid-19 di seluruh dunia menimbulkan pergeseran kebutuhan dan kebiasaan dari berbagai sektor dalam menjalankan operasional bisnisnya, terutama di sektor pendidikan. Dominasi pembelajaran tatap muka berubah menjadi pembelajaran jarak jauh berbasis daring untuk mengurangi kontak fisik selama pandemi. Hal ini mendorong pengembangan teknologi yang mendukung pembelajaran jarak jauh, walaupun konsep pembelajaran jarak jauh sudah tidak asing. Teknologi pembelajaran jarak jauh dimulai dari korespondensi melalui pos, audio, video, telekonferensi, *e-learning*, dan sekarang menuju ke teknologi XR. Teknologi XR ini diperlukan untuk mengatasi permasalahan dalam pembelajaran jarak jauh, yaitu kurangnya interaksi secara langsung, sehingga sulit untuk membangun kedekatan emosional (Pregowska, Masztalerz, Garlińska, & Osial, 2021).

Teknologi XR yang imersif diharapkan dapat membantu mahasiswa dalam memahami materi pembelajaran lebih baik dan memberikan pengalaman pembelajaran yang menarik, serta memberikan motivasi untuk meningkatkan hasil pembelajarannya (Gaol & Prasolova-Førland, 2022). Penelitian Pellas (2014) menunjukkan bahwa pengayaan materi tambahan

menggunakan dunia *virtual* yang berkualitas, berkorelasi positif terhadap efikasi diri, metakognitif pengaturan diri, dan *self-esteem*, dapat mendukung keterlibatan mahasiswa dalam aktivitas pembelajaran secara daring. Hal ini juga didukung oleh penelitian Tang et al. (2020) mengenai teknologi MR yang dikombinasikan dengan materi pembelajaran tradisional untuk pembelajaran berbasis studi kasus yang membutuhkan aspek visualisasi. Selain untuk menunjang pembelajaran materi, teknologi MR juga diharapkan dapat memberikan sebuah ruang edukasi yang terdiri dari kelas virtual beserta papan tulisnya di mana pengajar dan mahasiswa dapat diproyeksikan ke dalam dunia virtual seperti aktivitas fisik mengajar dan belajar secara langsung di dunia nyata (Campbell, Santiago, Hoo, & Mangina, 2017).

Berdasarkan peluang-peluang yang dihadirkan oleh teknologi XR, diperlukan pengkajian lebih lanjut mengenai penerapan teknologi XR yang telah dilakukan di Indonesia, maupun di luar Indonesia. Tidak hanya teknologi VR atau AR yang berdiri sendiri, tetapi juga integrasi kedua teknologi tersebut dalam MR. Tujuan dari penelitian ini adalah memberikan perbandingan penerapan teknologi XR yang ada di luar negeri dan Indonesia, dan memberikan rekomendasi untuk peningkatan teknologi XR di Indonesia. Setelah membandingkan pengembangan XR di perguruan tinggi di Indonesia dan di luar Indonesia, penelitian ini juga akan menganalisis keterkaitan XR dalam penerapan *metaverse* dan implikasinya, sehingga diperlukan tinjauan pustaka secra sistematik.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode *systematic literature review* (SLR) menurut Kitchenhamm dan Charters (2007). Tahapan dalam SLR adalah:

1. Perencanaan, yang meliputi pencarian *paper* terkait pengembangan teknologi MR melalui basis data perpustakaan Mendeley (Mendeley.com), Google Scholar, ScienceDirect, IEEE, dan Emerald; pembuatan struktur dan protokol *Population*, *Intervention*, *Comparison*, *Outcome*,

dan *Context* (PICOC); serta menentukan *boolean* dan kata kunci. PICOC dan kata kunci pencarian yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. PICOC Penelitian

***P**opulation*	Penelitian terkait *Mixed Reality/Extended Reality* pada pendidikan
***I**ntervention*	Metode, Implementasi, *Mixed Reality, Extended Reality*
***C**omparison*	Perbandingan metode dan implementasi *Mixed Reality/ Extended Reality* pada pendidikan
***O**utcome*	Kumpulan implementasi *Mixed Reality/ Extended Reality* pada pendidikan Rekomendasi yang bisa diberikan oleh perguruan tinggi di Indonesia dalam implementasi *Mixed Reality* dan *Extended Reality*
***C**ontext*	Perguruan tinggi (seluruh dunia termasuk Indonesia)

Tabel 2. Kata Kunci Pencarian

Search Engine	***Keyword***
Mendeley.com	"'mixed reality' higher education", "'extended reality' higher education" "'mixed reality' higher education", "'extended reality' higher education", "Indonesia", "pendidikan", "perguruan tinggi" Year: 5 tahun terakhir (mulai 2018) Bahasa: Inggris dan Indonesia Tidak termasuk: penelitian SLR yang sejenis
Google Scholar	
Science Direct	
IEEE	
Emerald	

2. Pelaksanaan, yang terdiri dari identifikasi penelitian dan pemilihan literatur utama melalui proses inklusi & eksklusi; penilaian kualitas literatur; proses ekstraksi data; dan proses sintesis data. Sebelum dilakukan tahap inklusi dan eksklusi, dilakukan cek duplikasi terhadap *paper* yang diperoleh menggunakan *tools* "Check for Duplicates" pada aplikasi Mendeley. Tahap identifikasi penelitian dan pemilihan literatur utama dapat dilihat pada Tabel 3, sedangkan tahap penilaian kualitas literature yang diambil berdasarkan tesis yang ditulis oleh Sekarhati (2020), dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 3. Identifikasi dan Pemilihan Literatur Utama

Proses	Proses Inklusi	Proses Eksklusi
Tahap Inisiasi	• *Paper* diterbitkan pada jurnal, *workshop*, *conference* • Tahun publikasi 2018 – 2022	• *Paper* tidak diterbitkan pada jurnal, *workshop*, *conference* • Tahun publikasi selain 2018 – 2022
Tahap 1 (Seleksi Judul dan Abstrak)	• Judul dan abstrak berkaitan dengan PICOC • Judul dan abstrak ditulis dalam Bahasa Inggris atau Indonesia	• Judul dan abstrak tidak berkaitan dengan PICOC • Judul dan abstrak tidak ditulis dalam Bahasa Inggris atau Indonesia • Judul dan abstrak mempunyai kalimat yang menunjukkan *paper* berbentuk SLR • *Paper* tidak mempunyai abstrak

Proses	Proses Inklusi	Proses Eksklusi
Tahap 2 (Seleksi *full-text*)	• Konten *paper* dapat diakses dan diunduh (secara publik atau menggunakan akun instansi penulis) • Konten *paper* ditulis dalam Bahasa Inggris atau Indonesia	• Konten *paper* tidak dapat diakses dan diunduh (secara publik atau menggunakan akun instansi penulis) • Konten *paper* tidak ditulis dalam Bahasa Inggris atau Indonesia

Tabel 4. Tahap Uji Kualitas

Checklist	Pertanyaan Uji Kualitas
C1	Apakah artikel mendeskripsikan tujuan penelitian secara jelas?
C2	Apakah artikel menuliskan kajian pustaka, latar belakang, dan konteks penelitian?
C3	Apakah artikel menampilkan *related work* dari penelitian sebelumnya guna menunjukkan kontribusi utama penelitiannya?
C4	Apakah artikel mendeskripsikan arsitektur usulan atau metodologi yang digunakan?
C5	Apakah artikel memiliki hasil penelitian?
C6	Apakah artikel menampilkan kesimpulan yang relevan dengan tujuan/permasalahan penelitian?
C7	Apakah artikel merekomendasi *future work* atau perbaikan ke depannya?
C8	Apakah artikel Terindeks scopus (Q1/Q2/Q3/Q4)?

Pada tahap uji kualitas, *paper* yang dipilih adalah *paper* yang mempunyai minimal 5 poin berdasarkan *checklist* uji kualitas. Setelah itu, proses sintesis data dapat dilanjutkan, hasilnya berbentuk tulisan, tabel, dan grafik pendukung.

3. Pelaporan hasil SLR, berbentuk artikel jurnal dan sudah dilakukan *review* sebelum dipublikasikan.

PEMBAHASAN

1. Proses *Systematic Literature Review*

Proses penelitian dimulai dengan melakukan pencarian menggunakan *keyword* yang sudah disepakati. Pada tahap inisiasi, jumlah *paper* yang berhasil ditemukan sebanyak 969 dengan jumlah duplikasi 87. Pada proses inklusi dan eksklusi tahap 1 diperoleh 110 *paper*, dan pada tahap 2 diperoleh 59 *paper*. Uji kualitas dilakukan berdasarkan *checklist* dan menghasilkan total 47 *paper.* Detail hasil dapat dilihat pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5. Hasil Pemilihan Literatur

Sumber	Tahap Inisiasi	Tahap 1	Tahap 2	Tahap 3
Mendeley.com	134	60	32	25
Google Scholar	77	32	23	19
Science Direct	431	8	1	1
IEEE	138	9	2	1
Emerald	189	1	1	1
Total	969 (masih ada *paper* yang duplikat)	110	59	47

Tabel 6. Jumlah Penelitian Sesuai Kriteria PICOC Berdasarkan Tahun dan Sumber

Sumber	Tahun	Jumlah
Mendeley.com	2018	4
	2019	7
	2020	5
	2021	6
	2022	3

Sumber	Tahun	Jumlah
Google Scholar	2018	1
	2019	3
	2020	6
	2021	5
	2022	4
Science Direct	2018	-
	2019	-
	2020	-
	2021	-
	2022	1
IEEE	2018	-
	2019	-
	2020	-
	2021	1
	2022	-
Emerald	2018	-
	2019	-
	2020	1
	2021	-
	2022	-

2. *Extended Reality* dan *Mixed Reality* di Seluruh Dunia dan Indonesia

Penelitian teknologi XR di luar Indonesia yang dapat diterapkan di perguruan tinggi terkumpul 21 *paper*. MR adalah teknik perpaduan VR dan AR, sedangkan XR adalah perpaduan AR, VR, dan MR dalam dunia nyata melalui *cinematography*, desain, grafik komputer, dan teknologi augmentasi (Aw et al. 2020; Pringle et al. 2022).

Alam (2021) mengembangkan XR dalam pembelajaran di pendidikan tinggi dari sisi *presence* dan *story telling*. Metode pengembangannya melalui tiga tahap yaitu analisis

aksesibilitas, replikasi dunia yang diinginkan, dan instruksi yang lengkap; desain *action-oriented interactions*; dan user testing dari sisi budaya, *compatibility*, dan privasi. Hasilnya adalah XR dapat mengembangkan pengalaman pembelajaran meskipun masih ada peningkatan yang harus dilakukan, mulai dari sisi koneksi jaringan, *cybersecurity,* hingga kualitas pengalaman yang didapatkan.

Candra, Shen, Guo, Sugihara, & Nishino (2019) menggunakan MR dalam mata kuliah Perancangan dan Perencanaan Perkotaan di Universitas Kanagawa dengan bantuan perangkat lunak SketchUp untuk membuat dan mengedit model 3D, dan HoloLens untuk memanipulasi objek menggunakan fitur *air bloom* dan *air tap*, seperti memperbesar, memperkecil, memindahkan, dan merotasi model. Pada pengembangan ini, mahasiswa membantu membuat objek beserta tekstur objek yang merepresentasi lingkungan sekitar yang dibutuhkan di SketchUp, kemudian mengkonfigurasikannya ke dalam perangkat lunak Unity dan menjadikan file *native visual studio* agar dapat diintegrasikan ke perangkat HoloLens. Penerapan pengalaman interaksi menggunakan HoloLens ini mempercepat proses perancangan sebelum mengkonstruksi bangunan, seperti merevisi rancangan secara efisien dari sisi waktu dan sumber daya, serta memberikan pengalaman visual yang baik. Namun, mahasiswa belum merasakan pengalaman *immersing* seperti di dunia nyata karena masalah penskalaan dan ukuran yang berbeda dengan dunia nyata, bidang penglihatan yang terbatas, akurasi yang sulit dikontrol, dan kualitas dari tekstur objek itu sendiri.

Richards et al. (2020) mengembangkan ruang bedah virtual untuk simulasi praktikum pembedahan. Untuk menciptakan pengalaman MR terdapat *endoscopy* yang posisinya disesuaikan dengan letak *endoscopy* pengguna yang dilacak secara *realtime* menggunakan VR *controller* berbentuk *endoscopy* yang dicetak 3D untuk mensinkronisasikan benda fisik di dunia nyata dan benda virtual. Tidak hanya objek *endoscopy* yang disinkronkan dengan dunia virtual, tetapi juga struktur anatomi dan instrumen lainnya yang menunjang pembedahan. Tampilan yang ada di layar *endoscopy* diprogram sedemikian rupa agar memiliki bidang pandang dan sumber pencahayaan untuk membantu memvisualisasikan struktur anatomi dalam

agar menyerupai *endoscopy* yang dijual di pasaran. Biaya pengembangan menggunakan peralatan VR di pasaran dan model 3D yang dicetak lebih hemat dibandingkan membeli atau berlangganan simulator yang telah ada.

Zhao, Pan, Gao, & Cheng (2022) mengembangkan integrasi MR dan *internet of things* (IOT) sebagai sensor untuk perancangan arsitektur berbasis performa. Terdapat tiga layer dalam sistem ini, yaitu *physical layer* berisi unit sensor yang terdiri dari sensor cahaya dan *microchip* Wi-Fi; *cloud layer* menggunakan platform IOT OneNet dan Tencent Cloud untuk menerima data dan mengecek sensor dalam keadaan nyala atau mati secara *realtime*; dan *visualization layer* menggunakan HoloLens, WeChat, dan aplikasi yang dikembangkan khusus untuk studi kasus untuk dikomparasikan apakah MR dapat membantu dalam proses pembelajaran. Sistem ini diujicobakan kepada 90 mahasiswa jurusan Arsitektur Universitas di China (Suzhou University) tahun pertama dan kedua menggunakan validasi *usability*. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan aplikasi meningkatkan keterlibatan mahasiswa.

Shrivastava, Kurniawan, & Sockalingam (2022) mengembangkan dua *prototipe* teknologi XR yang membantu proses pengajaran mata kuliah Pemrograman dan Keamanan Fisik Siber. *Prototipe* pertama adalah Robot AR menggunakan teknik *marker-based* AR yang mengaplikasikan pemrograman *python* untuk mengendalikan robot, kemudian dikomparasikan dengan robot fisik, yang memang digunakan oleh institusi tersebut. Hasil skor tidak jauh berbeda, sehingga RobotAR dapat menggantikan robot secara fisik sehingga lebih imersif dan ergonomis dalam biaya pemeliharaan dan penyimpanan. *Prototipe* kedua adalah PlantAR/VR digunakan untuk mensimulasikan pengamanan instalasi pengolahan air secara fisik di dalam maupun di luar lokasi dengan pengumpulan data dari pabrik.

Birt, Stromberga, Cowling, & Moro (2018) memaparkan penerapan MR berbasis *mobile* untuk pembelajaran kedokteran dan kesehatan seperti memvisualisasikan organ tubuh manusia dan simulasi pembedahan menggunakan kit berisi peralatan fisik yang telah dicetak dalam bentuk 3D. Instrumen berbentuk 3D tersebut mengirimkan data *marker* dan mengkonversi ke objek *virtual* melalui kamera ataupun *smartphone*.

Barrett et al. (2018) mengembangkan penerapan MR secara *realtime* untuk aktivitas praktikum di laboratorium teknik kimia yang meningkatkan kolaborasi mahasiswa dan pembelajaran berbasis *inquiry*. Hasil uji coba menunjukkan bahwa praktikum menggunakan MR dapat meningkatkan aktivitas eksplorasi dan interpretasi mahasiswa karena berisiko rendah terkait waktu dan tenaga yang dikerahkan dibanding dengan praktikum nyata. Dengan lebih seringnya mahasiswa bereksperimen, dapat membantu meningkatkan pemahaman mengenai berbagai macam perilaku pengujian praktikum yang dilakukan.

Cowling, Hillier, & Birt (2018) mengembangkan ujian berbasis elektronik untuk menilai kinerja mahasiswa. Sistem ujian berbasis elektronik yang sudah dikembangkan sejauh ini berbasis desktop, sedangkan teknologi MR lebih condong menggunakan *smartphone*. Sehingga diperlukan *emulator* seperti Genymotion atau Android Virtual Box yang diinstal di perangkat komputer. Pemindaian data *marker* di objek fisik dapat melalui *webcam* komputer. Keterbatasan sistem ini adalah membutuhkan peralatan lain, seperti *headset* sebagai *stereoscopic* untuk mendengar detak jantung.

Vasilevski dan Birt (2020) menguji coba pengalaman mengintegrasikan *building information modelling* dengan pembelajaran kontruksi bangunan berbasis *mobile* AR dan VR kepada mahasiswa pasca sarjana. Model ini menitikberatkan pada komunikasi informasi dan kolaborasi dalam pengelolaan proyek. Mahasiswa berkumpul dan berinteraksi dalam satu lingkungan virtual menggunakan *avatar* dengan plugin Photon Networking Unity3D. Sistem ini diuji coba menggunakan analisis tematik dari 70 esai yang dikumpulkan oleh mahasiswa yang berpartisipasi. Kendala teknis seperti penyakit simulator yang menyebabkan pusing, kesulitan dalam mengontrol pergerakan di lingkungan virtual, dan perangkat keras kurang nyaman untuk pemakaian lama, serta biaya peralatan yang sulit dijangkau.

Uhomoibhi, Onime, & Wang (2020) mengembangkan visualisasi bilik berbasis kode QR sebagai *marker* yang ditempatkan di setiap dinding bilik. *Marker-marker* tersebut berlaku sebagai titik untuk memasukkan objek MR dan dapat dipindai melalui *smartphone*. Hal ini dapat diterapkan dalam pembelajaran yang membutuhkan eksplorasi ke suatu tempat.

Robinson, Mitchell, & Brenseke (2020) mengembangkan aktivitas pembelajaran untuk anatomi pernapasan manusia menggunakan HoloLens. Sistem ini diujicobakan kepada 10 mahasiswa kedokteran tahun pertama dan dibagi menjadi dua kelompok untuk membandingkan hasil *pretest* dan *postest* mahasiswa yang didemonstrasikan menggunakan MR dan yang konvensional. Hasil uji coba menunjukkan bahwa perbandingan nilai *pretest* dan *postest* kelompok yang didemonstrasikan menggunakan MR meningkat signifikan. Hal ini karena pembelajaran yang interaktif dan menarik, sehingga mahasiswa dapat bereksplorasi langsung untuk menyesuaikan dengan informasi yang telah dipahami.

Schoeb et al. (2020) mengembangkan simulasi pemasangan kateter untuk mahasiswa kedokteran menggunakan HoloLens. Dengan sistem ini, mahasiswa dapat belajar mandiri, lebih fleksibel, dan hemat biaya. Kendala teknisnya adalah perangkat keras yang kurang nyaman, baterai mudah habis, dan membutuhkan jaringan yang lancar.

Allcoat et al. (2021) mengembangkan simulasi solar panel yang imersif untuk mahasiswa teknik. Simulasi ini dapat membantu mahasiswa untuk bereksperimen menggunakan berbagai macam parameter yang dapat mempengaruhi efisiensi panel tenaga surya, seperti intensitas cahaya, ketidakcocokan panel, dan sudut kemiringan.

Pickering et al. (2021) meneliti perbandingan pembelajaran anatomi saraf menggunakan MR dalam bentuk hologram dan menggunakan *screencast*. Dari aspek perolehan pengetahuan dan hapalan berdasarkan hasil ujicoba, menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan antara menggunakan MR dan *screencast*, sedangkan dari aspek keterlibatan emosional dan ketertarikan tidak ada masalah. Penelitian Pickering berfokus pada apakah teknologi MR dapat menggantikan media *screencast* dari sisi retensi pengetahuan dalam konteks pendidikan kedokteran.

Birt, Clare, & Cowling (2019) mengembangkan multimoda *learning analytics* untuk pembelajaran anatomi jantung menggunakan *smartphone*. Mahasiswa dapat melihat dan berinteraksi dengan objek anatomi jantung secara virtual melalui objek fisik berbentuk kubus yang dicetak 3D. Data analitik yang ditangkap untuk laporan penilaian melalui rekaman interaksi

mahasiswa dengan obyek saat menjawab pertanyaan dalam moda pengujian.

Beh Rashidi, Talei, & Lee (2021) mengembangkan gamifikasi pembelajaran materi utilitas pembangunan di Program Studi Teknik untuk memberikan pemahaman sistem bangunan yang meminimalisir kecelakaan. Untuk menunjang pengalaman simulasi yang imersif, perlu menciptakan lingkungan virtual beserta objek-objek seperti bangunan rumah, kamar tidur, pipa air hujan, dan membuat skenario seperti simulasi sistem Light Steel Framing, sistem ventilasi udara, sistem pipa air, dan sistem atap bangunan.

Siyaev dan Jo (2021) mengembangkan simulasi pemeliharaan pesawat terbang menggunakan HoloLens yang diintegrasikan dengan *speech based interaction* menggunakan *deep learning* CNN *network*. Hasil ujicoba menunjukkan bahwa sistem ini dapat meningkatkan efisiensi mengoperasikan alat tanpa harus menggunakan pergerakan tangan atau menekan tombol.

Ellern dan Cruz (2021) mengembangkan XR untuk menambah pelayanan perpustakaan. Pengembangan XR dilakukan berdasarkan hasil *interview* dari 13 sumber yang pernah melakukan simulasi XR yang ada di Amerika. Hasilnya adalah XR masih mempunyai berbagai tantangan dari sisi finansial, keamanan data, beban fisik seperti pusing dan mabuk, mobilitas, hingga sumber daya manusia.

Ilić et al. (2021) mengembangkan XR pada universitas di Sirbea dengan mengambil sampel dari 100 mahasiswa untuk mengetahui apakah XR cocok diimplementasikan pada pendidikan di Sirbea, terutama setelah pandemi Covid-19. Hasilnya adalah XR dapat diterapkan terutama dalam pembelajaran yang dipersonalisasi dan konsultasi, meskipun ada beberapa hal yang harus diperhatikan, yaitu *privacy* dan transparansi data.

Pringle et al. (2022) mengembangkan XR dalam ilmu forensik dengan menggunakan *platform* Thinglink. Thinglink sendiri adalah *platform* yang dapat diakses dari internet di mana *user* dapat mengunggah gambar dan beberapa variasi *hotspot* seperti teks, file audio, atau link ke gambar lainnya. *User* juga dapat mengunggah gambar atau video yang dapat berputar 360°. Dalam penelitiannya, XR terbukti potensial

dalam memberikan pengajaran bidang forensik dengan baik karena *24/7 availability*, *asynchronous*, terintegrasi, dan dapat memberikan ruang bagi mahasiswa untuk bereksplorasi. Namun XR mempunyai tantangan karena pembuatannya memerlukan waktu (*time consuming*), kemampuan *programming* yang kompleks, hanya menerima *scientific input*, jaringan internet belum memadai, dan belum mendukung untuk mahasiswa disabilitas atau yang tidak ahli memakai teknologi.

Sample (2020) mengimplementasikan MR dalam bentuk tur kampus dan perpustakaan untuk membantu mahasiswa terutama yang mengalami permasalahan *library anxiety*. Fitur yang dibuat adalah tombol informasi dan tombol untuk bergerak.

Paper tentang pengembangan teknologi MR di perguruan tinggi di Indonesia belum sebanyak di luar negeri. Namun, ada satu *paper* yang ditulis oleh Kautsar, Damardono, dan Suryawinata (2021), yang membuat ruang kelas *virtual* 3D berdasarkan ruang kelas nyata secara fisik menggunakan metode *marker*, kemudian memasukkan materi pembelajaran dalam bentuk AR melalui pemindaian kode QR, untuk membuat data *marker* menggunakan Vuforia. Sistem diujicobakan melalui *beta testing* kepada 112 mahasiswa sarjana tahun pertama sampai tahun keempat. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan MR dalam proses pembelajaran memberikan pengalaman berinteraksi yang lebih menarik dibandingkan *platform e-learning* yang berbasis web.

3. *Virtual Reality* di Seluruh Dunia dan Indonesia

VR juga dibahas pada beberapa penelitian di luar negeri yaitu:

a. Dahya, King, Lee K. J., & Lee, J. H. (2021), mengimplementasikan VR pada perpustakaan Washington State Libraries yang sudah bekerja sama dengan Oculus (suatu organisasi penyedia VR) di tahun 2018. Penelitian membuktikan bahwa VR dapat digunakan di perpustakaan, terutama bagi pembaca yang ingin mengetahui informasi dari dokumen yang memerlukan *sensory* dan dialog visual. Namun VR juga mempunyai kelemahan, yaitu ketika materi yang dipelajari adalah sesuatu yang ekstrim seperti sejarah perang atau konspirasi, dan ketika penggunaan VR membuat user terlalu "menempel" dengan dunia tersebut.

b. Ruiz-Cantisani et al. (2020), mengimplementasikan VR pada pembelajaran kimia di universitas pada masa Covid-19. VR diujicoba kepada 72 mahasiswa dan 2 dosen. Hasilnya adalah VR berhasil mengurangi jumlah *passive learner* dan implementasi VR berhasil meningkatkan motivasi mahasiswa untuk belajar. Meskipun begitu, VR memerlukan peningkatan terutama dari sisi *device* yang dipakai, seperti lensa, kabel, *headphone*, dan lainnya.

c. Ho, Sun, & Tsai (2019), mengembangkan lukisan 3D untuk mendesain rancangan baju menggunakan Google Tilt Brush. Mahasiswa dapat memasuki dunia virtual untuk membuat lukisan 3D di objek model 3D yang sudah disediakan. Hasil uji coba menunjukkan mahasiswa dapat lebih imersif, lebih berkonsentrasi karena berada di dalam ruang spasial, meningkatkan minat, dan kepercayaan diri.

d. Adnan et al. (2020) mengembangkan materi pembelajaran berbentuk video 360 derajat untuk memberikan pengalaman yang imersif. Hasil survei kepada 560 mahasiswa diploma dan *focus group discussion* menunjukkan bahwa media pembelajaran yang imersif dapat membantu minat, tetapi jaringan internet yang kurang bagus menjadi kendala. Gandolfi, Kosko, & Ferdig (2021) juga mengembangkan pengalaman belajar menggunakan media video 360 derajat untuk program pelatihan mahasiswa jurusan keguruan. Keterbatasan materi media video 360 derajat memiliki konsep imersif yang berubah seiring waktu dan persepsi pengguna berikutnya.

e. Verdes, Navarro, & Álvarez-Campos (2021) membuat cagar alam laut secara virtual menggunakan teknik video 360 derajat untuk memberikan pengalaman menyelam yang imersif, observatif, dan eksploratif.

f. Hensen, Koren, & Klamma (2019) mengimplementasikan gamifikasi yang kolaboratif untuk anatomi tubuh manusia menggunakan HoloLens dan di dalamnya terdapat kuis interaktif. Tetapi, ketika ada salah satu mahasiswa yang menjawab, mahasiswa lain dapat melihat jawabannya, sehingga memasukkan fitur kuis untuk penilaian kinerja mahasiswa secara individual kurang cocok digunakan.

Untuk studi kasus di Indonesia, terdapat dua *paper* mengenai pengembangan teknologi VR. Matahari (2022) mengembangkan pembelajaran interaktif menggunakan A-Frame WebXR yang berbasiskan HTML. Materi yang disajikan mengenai informasi dan sejarah Christoper Colombus yang dikemas dalam dunia virtual yang interaktif. Mahasiswa dapat mengeksplorasi dunia virtual tersebut dan berinteraksi dengan objek-objek yang ada di situ untuk menggali dan mempelajari informasi. Revianti dan Anggoro (2022) mengembangkan kelas *virtual* menggunakan *platform* Mozilla Hubs yang menawarkan kolaborasi antar pengguna seperti berbagi model objek 3D, berkomunikasi melalui teks atau audio, dan membuat kelompok kecil di lingkungan kelas virtual. Kelas virtual ini diujicobakan kepada satu kelas dan hasilnya menunjukkan bahwa mahasiswa lebih percaya diri untuk berbicara di kelas karena menggunakan *avatar*, dan tidak perlu meninggalkan rumah atau dapat dilakukan di mana saja. Walaupun dampak negatif teknologi VR menyebabkan gejala penyakit simulator yang ringan apabila menggunakan *oculus rift* dalam waktu yang cukup lama. Kendala teknis seperti jaringan, menyebabkan adanya jeda, gangguan audio, dan gangguan video. Dari sisi keterlibatan secara afektif dengan pengajar dan mahasiswa lain, model *avatar* yang digunakan belum mewakili pengalaman berinteraksi dan melihat emosi seperti di dunia nyata. Dari sisi platform Mozilla Hubs sendiri, masih ada fitur-fitur yang belum merepresentasikan kondisi kelas di dunia nyata, seperti menampilkan *slide* materi secara duplikat: satu yang dilihat mahasiswa di depan kelas, satu lagi di depan pengajar, sehingga pengajar dapat melihat ke arah tempat duduk mahasiswa; jam di ruang kelas untuk mengecek waktu yang telah berjalan; fitur papan tulis virtual kurang fleksibel; fitur untuk komunikasi teks dapat terabaikan karena posisinya berada di bawah sudut pandang dan dapat menghilang dalam durasi waktu tertentu.

4. *Augmented Reality* di Seluruh Dunia dan Indonesia

Aw et al. (2020) mengembangkan aplikasi bernama NuPOV (*Nucleophile's Point of View*) yang merupakan hasil kolaborasi Tim IT, Departemen Kimia, dan Departemen Pendidikan universitas dengan tujuan membantu mahasiswa Teknik Kimia mempelajari molekul kimia menggunakan AR. Aplikasi

ini dibuat untuk melengkapi pengajaran kimia sebelumnya yang sudah menggunakan 2D dan membantu mahasiswa untuk mensimulasikan secara visual apa yang sudah dipelajari tanpa membahayakan. Aplikasi NuPOV ini gratis dan masih dikembangkan sampai pada penelitian dipublikasi.

Christopoulos, Mystakidis, Pellas, & Laakso (2021) mengembangkan *learning analytics* untuk pembelajaran menggunakan AR. Sistem menyimpan data *log* dari sensor yang dipasang di peralatan AR untuk mengevaluasi kinerja dan perolehan pengetahuan yang dilakukan oleh mahasiswa. Untuk mengetahui aspek psikologis dari penggunaan teknologi AR, terdapat survei mengenai pengalaman menggunakan AR dan dari log yang dikirimkan sensor seperti pelacakan gerakan mata dan gerakan tubuh. Kebijakan dan praktik yang perlu disoroti adalah mengenai pertimbangan etis penggunaan teknologi AR seperti privasi, menghindari penggunaan data yang tidak digunakan atau berbahaya, dan melihat aspek kognitif sosial dan sosial budaya.

Knierim, Kiss, & Schmidt (2018) membuat prototipe *flux thermal* melalui AR untuk memvisualisasikan dan bereksperimen secara kolaboratif untuk mata kuliah Fisika Termodinamika menggunakan HoloLens. Kamera Hololens dan kamera sensor termal dipasang di depan tongkat besi yang terbuat dari aluminum atau tembaga untuk mendapatkan data *marker* dan menangkap temperatur secara *realtime*. Implementasi ini belum diujicobakan karena masih dalam tahap prototype.

Fernandes, Teles, & Teixeira (2020) mengembangkan model sumsum tulang belakang berbasiskan *mobile* untuk mempelajari anatomi saraf. Setelah diuji coba dan dibandingkan dengan metode konvensional, penggunaan AR ini lebih efisien dan meningkatkan pemahaman mahasiswa karena memberikan pengalaman spasial.

Nadeem, Chandra, Livirya, & Beryozkina (2020) mengembangkan AR yang berorientasi kepada laboratorium untuk memvisualisasikan pengalaman yang imsersif di dalam laboratorium, seperti perlengkapan dan kebijakan keamanan.

Verdes, Navarro, & Álvarez-Campos (2021) mengembangkan AR model invertebrata untuk kelas laboratorium menggunakan teknik QR *code marker based*. Selain dapat memindai di lokasi langsung, terdapat juga fitur kode QR

sementara dengan mengambil foto sehingga dapat dilihat di manapun dan kapanpun.

Marcel (2019) mengimplementasikan objek pembelajaran AR dan informasinya dapat disimpan dalam sebuah repositori, digunakan kembali, dan dibagikan kepada orang lain menggunakan HP Reveal atau Aurasma. Keterbatasan dari platform ini adalah belum ada fitur komentar atau komunikasi antar pengguna lain, belum ada fitur jumlah view, belum ada informasi tanggal kapan objek tersebut dipublikasikan.

Dari Indonesia, diperoleh delapan *paper* pengembangan teknologi AR yang dapat digunakan di perguruan tinggi Indonesia. Dede, Abdullah, Mulyanti, & Rohendi (2018) membuat mesin berbahan bakar bensin berbasis *mobile* menggunakan Vuforia untuk kegiatan praktikum program diploma jurusan Teknik Mesin. Dengan melihat mesin tersebut bekerja, mahasiswa dapat mempersiapkan pengetahuan secara visual dan nyata sebelum memulai praktikum.

Kharishma (2020) mengembangkan teknologi AR dalam pameran seni dan desain. Pengunjung pameran dapat melihat informasi mengenai karya seni yang dipindai melalui *smartphone*. Kendala teknis dalam memindai *marker* untuk objek karya seni adalah kecepatan dalam merekognisi objek, kontras warna dari objek yang dipengaruhi oleh pencahayaan yang buruk, dan garis-garis gambar di objek tersebut. Walaupun terdapat kendala teknis, hasil survei menunjukkan reaksi yang positif dari mahasiswa karena terdapat potensi untuk dapat menampilkan animasi tersembunyi.

Prasetya, Fajri, & Ranuharja (2020) mengembangkan lembar kerja mahasiswa jurusan Teknik Mesin untuk mata kuliah Pemrograman *Computer Numerical Control*. Lembar kerja berbasis AR tersebut diuji coba oleh pakar untuk validitas, diuji coba oleh praktisi untuk mengetahui kemudahan dalam menilai lembar kerja mahasiswa, dan diuji coba efektivitasnya oleh sejumlah kecil mahasiswa Universitas Negeri Padang jurusan Teknik Mesin melalui uji korelasi *t-test* antara *pretest* dan *posttest*.

Pujiastuti dan Haryadi (2020) menguji coba media pembelajaran untuk konsep keamanan makanan berbasis AR kepada mahasiswa. Uji coba *pretest* dan *postest* dilakukan kepada dua kelompok, yaitu kelompok yang menggunakan AR dan kelompok yang menggunakan media pembelajaran

konvensional. Detail penerapan teknologinya tidak dibahas secara mendalam karena fokus penelitian kepada apakah AR dapat membantu mahasiswa dalam memahami konsep pada materi pembelajaran untuk moda *blended learning*. Hasil penelitian menyatakan, teknologi AR memberikan pengalaman simulasi secara visual bagaimana aplikasi di dunia nyata dapat meningkatkan antusias mahasiswa untuk belajar.

Dede, Abdullah, & Mulyanti (2021) mengembangkan aplikasi kartu praktikum digital mata kuliah Teknik Otomotif untuk mahasiswa diploma jurusan Teknik Mesin menggunakan teknik *marker-based* AR. Pandemi Covid-19 menyebabkan pembelajaran dialihkan ke pembelajaran daring, padahal proses pembelajaran mahasiswa diploma lebih menekankan kepada pembelajaran berbasis praktik. Pada kartu tersebut, terdapat kode QR untuk menampilkan objek dan video 3D.

Damayanti, Nurwahidah, Hamdani, & Hasim (2021) mengembangkan model sinektik dalam pembelajaran menulis cerita pendek untuk program studi Pendidikan Bahasa dan Sastra Indonesia. Objek-objek 3D yang merepresentasikan latar dan tokoh ditampilkan dalam layar *smartphone* untuk mendalami ide cerita yang akan ditulis.

Hamzah et al. (2021) mengembangkan materi untuk mata kuliah Jaringan Komputer menggunakan teknik *marker-based* AR. Mahasiswa dapat memindai objek 2D dari aplikasi menggunakan *smartphone* kemudian dikonversi menjadi objek 3D dan dapat dilihat informasi dari objek tersebut. Pengembangan ini diujicobakan kepada 31 mahasiswa menggunakan *System Usability Scale*.

Fajrianti et al. (2022) mengembangkan aplikasi AR dengan *artificial intelligence* untuk menangkap pergerakan anatomi tubuh manusia secara *realtime*. Karakter model 3D yang disiapkan adalah anatomi tulang, anatomi otot, dan sistem peredaran darah. Melalui kamera *smartphone*, aplikasi menangkap satu tubuh manusia dari kepala sampai ujung kaki, kemudian menangkap pergerakan seperti memajukan tangan kiri dan kaki kanan. Dari menangkap pergerakan manusia secara *realtime* dikonversikan ke beberapa *node* dan *edge* yang akan digunakan oleh karakter model 3D untuk menentukan letak persendian. Jika sudah selesai dilakukan proses *rendering object* 3D untuk menampilkan ke layar *smartphone*.

5. Diskusi dan Rekomendasi

Berdasarkan hasil penelusuran 47 *paper* terkait pengembangan XR, MR, VR, dan AR di pendidikan tertinggi, ada beberapa hal yang bisa ditemukan yaitu:

a. Pendidikan tinggi di Indonesia sudah mulai menerapkan AR dan VR dalam pembelajaran interaktif, terutama untuk pembelajaran otomotif dan mesin seperti penelitian Dede, Abdullah, Mulyanti, & Rohendi (2018), Prasetya, Fajri, & Ranuharja (2020), dan Dede, Abdullah, & Mulyanti (2021). Implementasi VR pada penelitian di Indonesia lebih banyak berbasis internet seperti pada penelitian Matahari (2022) dan Revianti dan Anggoro (2022)

b. XR, MR, VR, dan AR sudah diterapkan untuk mata kuliah yang memerlukan analisis detail seperti mata kuliah Kedokteran pada penelitian Birt, Stromberga, Cowling, & Moro (2018), Cowling, Hillier, & Birt (2018), Pringle et al. (2022), Richards et al. (2020), dan Fajrianti et al. (2022); Perkotaan dan Perancangan Bangunan pada penelitian Candra, Shen, Guo, Sugihara, & Nishino (2019) dan Zhao, Pan, Gao, & Cheng (2022); Kimia pada penelitian Ruiz-Cantisani et al. (2020) dan Aw et al. (2020); Teknik Mesin dan Otomotif pada penelitian Dede, Abdullah, Mulyanti, & Rohendi (2018), Prasetya, Fajri, & Ranuharja (2020), Dede, Abdullah, dan Mulyanti (2021); Keamanan Makanan pada penelitian Pujiastuti dan Haryadi (2020); dan Kesenian pada penelitian Kharishma (2020).

c. Implementasi XR pada perguruan tinggi di Indonesia belum sebanyak di luar negeri. Hal ini terlihat dari beberapa penelitian luar negeri yang sudah menerapkan XR pada pembelajaran mata kuliah kedokteran, forensik, hingga perpustakaan.

d. XR, MR, dan VR sudah bisa diterapkan tidak hanya pada kelas, tapi juga pada perpustakaan seperti yang disebutkan Ellern dan Cruz (2021) dan Dahya, King, Lee K. J., & Lee, J. H. (2021).

e. Tantangan penggunaan XR, MR, VR, dan AR mempunyai kemiripan satu sama lain berdasarkan penelitian dari luar negeri dan Indonesia, antara lain:

1) *Device* (alat visual, audio, dan *sensory*) dan alat pelengkap (seperti ruangan) yang tidak memadai sehingga menyebabkan seseorang belum mendapatkan pengalaman "merasakan" berada di teknologi, seperti yang disebutkan Alam (2021), Candra, Shen, Guo, Sugihara, & Nishino (2019), Cowling, Hillier, & Birt (2018), Ruiz-Cantisani et al. (2020), Revianti dan Anggoro (2022), dan Kharishma (2020).
2) Beban fisik seperti pusing, mabuk, gejala sakit kepala, tidak nyaman, dan kesulitan untuk fokus dan berkonsentrasi seperti yang disebutkan Ellern dan Cruz (2021) dan Revianti dan Anggoro (2022).
3) Finansial yaitu sumber dana dari universitas atau lainnya seperti pada penelitian Ellern dan Cruz (2021).
4) *Privacy,* etika, dan keamanan data seperti yang disebutkan Alam (2021), Ellern dan Cruz (2021), dan Ilić et al. (2021). Hal ini dikarenakan penerapan teknologi ini memerlukan jaringan internet dan masih tergolong baru, sehingga masih sangat rentan dengan kebocoran data.
5) Kualitas bahan pembelajaran seperti yang disebutkan Dahya, King, Lee K. J., & Lee, J. H. (2021), Revianti dan Anggoro (2022).
6) Belum sepenuhnya mendukung seseorang yang mempunyai disabilitas dan tidak mempunyai kemampuan dalam bidang TI seperti yang disebutkan Pringle et al. (2022).

Dari temuan ini, terlihat bahwa penerapan XR, MR, AR, dan VR masih bisa ditingkatkan terutama di Indonesia. Hal menarik yang ditemukan adalah adanya penggunaan aplikasi platform Thinglink, seperti pada penelitian Pringle et al. (2022), yang dapat digunakan secara gratis dalam rentang waktu tertentu. Platform ini bisa digunakan oleh pendidikan tinggi di Indonesia ketika ingin mencoba implementasi tahap awal XR atau MR. Penerapan XR, MR, AR, dan VR terkait materi yang membutuhkan visual meningkatkan keterlibatan mahasiswa dan kebebasan dalam bereksplorasi.

Tantangan penerapan XR, MR, VR, dan AR ini sangat berkaitan dengan masalah yang umum ditemukan seperti *device,* materi, dan lainnya. Di Indonesia, implementasi AR masih lebih banyak jika dilihat pada *paper* yang ditemukan penelitian ini. Menurut Ellern dan Cruz (2021), beberapa hal yang bisa dilakukan menghadapi tantangan penerapan XR, MR, VR, dan AR adalah:

a. meningkatkan kualitas dan kuantitas materi, audio, lensa, video, dan sensor. Hal ini bisa berupa penambahan materi pembelajaran, penanganan lensa yang memadai, pengurangan waktu video, kualitas teks yang tidak terlalu cepat, dan lainnya;
b. membuat *stakeholder* memahami pentingnya penerapan XR, MR, VR, dan AR pada pendidikan. *Stakeholder* bisa meliputi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia, manajemen universitas di Indonesia, dan mahasiswa, karena mahasiswa mempunyai peran penting dalam penerapan teknologi di bidang pendidikan;
c. memberikan pelatihan kepada pengguna dan tim yang memakai teknologi, karena tidak semua orang di instansi pendidikan mempunyai tingkat kemampuan TI yang setara. Selain itu, kemampuan penanganan medis juga diperlukan untuk menanggulangi beban fisik yang dapat terjadi dalam pemakaian XR, MR, VR, dan AR ini;
d. memberikan pengaturan ruangan yang memadai karena alat XR, MR, VR, dan AR sangat sensitif. Hal ini terlihat pada beberapa penelitian di mana kesalahan teknis dapat terjadi karena lantai yang tidak rata, penempatan alat yang berhubungan dengan listrik, seperti *headset* dan stop kontak yang tidak lengkap, ruangan tidak kedap suara, dan lainnya;
e. memperluas koneksi antar tim seperti dengan pengguna dan *developer* (*collaborative*) agar ketika ada isu terkait TI, seperti jaringan internet dan keamanan data, maka isu tersebut dapat ditangani dengan segera;
f. mencari sumber daya manusia dengan *softskill* yang dapat menangani seseorang dengan sabar dan paham integritas, karena penerapan XR, MR, VR, dan AR berpotensi

membuat penggunanya terlalu "menempel" pada teknologi, sehingga sumber daya ini menjadi salah satu hal yang penting;

g. meningkatkan kemampuan teknologi XR, MR, VR, dan AR untuk penyandang disabilitas.

Tantangan lain dari penerapan XR, MR, VR, dan AR terkait dengan *metaverse* untuk dikaji lebih lanjut adalah mengenai konsep kolaborasi antar mahasiswa dan pengajar dalam kelas seperti pada penelitian Barrett et al. (2018), Vasilevski and Birt (2020), Revianti dan Anggoro (2022). Kolaborasi yang bersifat projek kelompok, diskusi, dan praktikum dapat membantu mahasiswa lebih bereksplorasi dan lebih terlibat dengan teman sekelas. Untuk implementasi kuis atau tes yang bersifat virtual dalam konteks *metaverse*, berdasarkan penelitian Hensen (2019), selain masih belum banyak yang dikaji lebih lanjut, penggunaan HoloLens belum memberikan keamanan dari mencontek antar mahasiswa. Hal ini dapat menjadi tantangan implementasi XR, MR, VR, dan AR dalam konteks *metaverse*.

KESIMPULAN

XR, MR, AR, dan VR adalah suatu teknologi *reality* yang dapat membuat sesuatu yang tidak nyata dipadukan dengan yang nyata. Pada dunia pendidikan tinggi, hal ini bisa diterapkan pada berbagai jurusan serta layanan pendukungnya. Namun, saat ini di Indonesia lebih banyak penerapan pada VR dan AR dibandingkan pada XR dan MR. Tahap awal implementasi XR dan MR di Indonesia bisa diterapkan dengan menggunakan platform seperti Thinglink, HoloLens, perangkat lunak SketchUp, dan lainnya. Selain penerapan teknikal, pihak perguruan tinggi di Indonesia juga perlu melihat beberapa tantangan penerapan XR, MR, AR, dan VR ini. Tantangan ini dapat diatasi dengan beberapa solusi mulai dari peningkatan kualitas dan kuantitas materi hingga peningkatan kemampuan teknologi, termasuk untuk menuju ke era *metaverse* di mana lebih menekankan pada aspek sosial dan kolaborasi dalam konteks pendidikan tinggi.

Penelitian ini bersifat SLR, sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut. Penelitian dapat ditingkatkan dengan penguraian bahan hasil eksperimen penerapan XR, MR, AR, dan VR terbaru. Penelitian juga bisa ditingkatkan dengan analisis penerapan teknologi ini di instansi pendidikan selain perguruan tinggi seperti Sekolah Menengah. Meskipun begitu, penulis berharap penelitian ini dapat menjadi referensi penelitian selanjutnya dalam menganalisis penerapan XR, MR, AR, dan VR dalam konteks pendidikan tinggi di Indonesia dan seluruh dunia.

DAFTAR PUSTAKA

Adnan, A. H. M., Shak, M. S. Y., Karim, R. A., Tahir, M. H. M. & Shah, D. S. M. (2020). 360-degree videos, VR experiences and the application of education 4.0 technologies in Malaysia for exposure and immersion. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems 5*(1). DOI: 10.25046/aj050148.

Alam, A. 2021. Designing XR into higher education using Immersive Learning Environments (ILEs) and hybrid education for innovation in HEIs to attract UN's Education for Sustainable development (ESD) initiative. Pp. 1–9 in *2021 International Conference on Advances in Computing, Communication, and Control (ICAC3)*.

Allcoat, D., Hatchard, T., Azmat, F., Stansfield, K., Watson, D., & Mühlenen, A. V. (2021). Education in the digital age: learning experience in virtual and mixed realities. *Journal of Educational Computing Research, 59*(5). DOI: 10.1177/0735633120985120.

Aw, J. K., Boellaard, K. C., Tan, T. K., Yap, J., Loh, Y. P., Colasson, B. et al. (2020). Interacting with three-dimensional molecular structures using an augmented reality mobile app. *Journal of Chemical Education, 97*(10). DOI: 10.1021/acs.jchemed.0c00387.

Barrett, R., Gandhi, H. A., Naganathan, A., Daniels, D., Zhang, Y., Onwunaka, C. et al. (2018). Social and tactile mixed reality increases student engagement in undergraduate lab activities. *Journal of Chemical Education, 95*(10). DOI: 10.1021/acs.jchemed.8b00212.

Beh, H. J., Rashidi, A., Talei, A., & Lee, Y. S. (2021). Developing engineering students' capabilities through game-based virtual reality technology for building utility inspection. *Engineering, Construction and Architectural Management*. DOI: 10.1108/ECAM-02-2021-0174.

Birt, J., Clare, D., & Cowling, M. (2019). Piloting multimodal learning analytics using mobile mixed reality in health education. In *2019 IEEE 7th International Conference on Serious Games and Applications for Health, SeGAH 2019*.

Birt, J., Stromberga, Z., Cowling, M., & Moro, C. (2018). Mobile mixed reality for experiential learning and simulation in medical and health sciences education. *Information (Switzerland), 9*(2). DOI: 10.3390/info9020031.

Campbell, A. G., Santiago, K., Hoo, D., & Mangina E. (2017). Future mixed reality educational spaces. In *FTC 2016 - Proceedings of Future Technologies Conference*.

Candra, A., Shen, Z., Guo, X., Sugihara, K., & Nishino, T. (2019). Feasibility study of mixed reality on education of design and planning students based on bloom taxonomy. *International Journal of Sustainable Society, 11*(3). DOI: 10.1504/IJSSOC.2019.103697.

Christopoulos, A., Mystakidis, S., Pellas, N., & Laakso, M. J. (2021). ARLEAN: an augmented reality learning analytics ethical framework. *Computers, 10*(8). DOI: 10.3390/computers10080092.

Cowling, M., Hillier, M., & Birt, J. (2018). Integrating mixed reality spatial learning analytics into secure electronic exams. In *ASCILITE 2018 - Conference Proceedings - 35th International Conference of Innovation, Practice and Research in the use of Educational Technologies in Tertiary Education: Open Oceans: Learning Without Borders*.

Dahya, N., King, W. E., Lee K. J., & Lee, J. H. (2021). Perceptions and experiences of virtual reality in public libraries. *Journal of Documentation, 77*(3). DOI: 10.1108/JD-04-2020-0051.

Damayanti, D. A., Nurwahidah, L. S., Hamdani, A., & Hasim, A. (2021). The design of augmented reality-based synectic model device in writing short stories. *MEDIASI 2*(3), : 221–41.

Dede, Abdullah, A. G., Mulyanti, B., & Rohendi, D. (2018). Virtual gasoline engine based on augment reality for mechanical engineering education. In *MATEC Web of Conferences*. Vol. 197.

Dede, Abdullah, A. G., Mulyanti, B., & Rohendi, D. (2021). Augmented reality based digital practicum card design and implementation during the covid-19 pandemic. *EDUCARE 14*(1), : 19–34.

Ellern, G. D., Cruz, L. (2021). Black, white, and grey: the wicked problem of virtual reality in libraries. *Information Technology & Libraries, 40*(4).

Fajrianti, E. D., Sukaridhoto, S., Al Rasyid, M. U. H., Suwito, B. E., Budiarti, R. P. N., Al Hafidz, I. A. et al. (2022). Application of augmented intelligence technology with human body tracking for human anatomy education. *International Journal of Information and Education Technology„12*(6).

Fernandes, J. R. N., Teles, A. S., & Teixeira, S. (2020). An augmented reality-based mobile application facilitates the learning about the spinal cord. *Education Sciences, 10*(12). DOI: 10.3390/educsci10120376.

Gandolfi, E., Kosko, K. W., & Ferdig, R. E. (2021). Situating presence within extended reality for teacher training: validation of the Extended Reality Presence Scale (XRPS) in preservice teacher use of immersive 360 video. *British Journal of Educational Technology, 52*(2). DOI: 10.1111/bjet.13058.

Gaol, F. L., Prasolova-Førland, E. (2022). Special section editorial: the frontiers of augmented and mixed reality in all levels of education. *Education and Information Technologies 27*(1).

Hamzah, M. L., Ambiyar, Rizal, F., Simatupang, W., Irfan, D., & Refdinal. (2021). Development of augmented reality application for learning computer network device. *International Journal of Interactive Mobile Technologies, 15*(12). DOI: 10.3991/ijim.v15i12.21993.

Hensen, B., Koren, I., & Klamma, R. (2019). Gamification support for learning in spatial computing environments. *Journal of Universal Computer Science 25*(12).

Ho, L. H., Sun, H., & Tsai, T. H. (2019). Research on 3D painting in virtual reality to improve students' motivation of 3D animation learning. *Sustainability (Switzerland), 11*(6). DOI: 10.3390/su11061605.

Ilić, M. P., Păun, D., Šević, N. P., Hadžić, A. & Jianu, A. (2021). Needs and performance analysis for changes in higher education and implementation of artificial intelligence, machine learning, and extended reality. *Education Sciences, 11*(10). DOI: 10.3390/educsci11100568.

Jeon, H., Youn, H., Ko, S., & Kim, T. (2022). Blockchain and AI meet in the metaverse. In *Blockchain Potential in AI*.

Kautsar, I., Damardono, A., & Suryawinata, M. (2021). Mixed reality updatable content for learning supportive tools. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1098*(5). DOI: 10.1088/1757-899x/1098/5/052113.

Kharishma, V. (2020). *Marker-based augmented reality for exhibition in higher education*.

Kitchenham, B., Charters, S. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. *Technical Report, Ver. 2.3 EBSE Technical Report. EBSE*.

Knierim, P., Kiss, F., & Schmidt, A. (2018). Look inside: understanding thermal flux through augmented reality. In *Adjunct Proceedings - 2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR-Adjunct 2018*.

Marcel, F. (2019). Mobile augmented reality learning objects in higher education. *Research in Learning Technology 27*. DOI: 10.25304/rlt.v27.2133.

Matahari, T. (2022). WebXR asset management in developing virtual reality learning media. *Indonesian Journal of Computing, Engineering, and Design, 4*(1):38–46.

Mystakidis, S. (2022). Metaverse. *Encyclopedia 2*(1). DOI: 10.3390/encyclopedia2010031.

Nadeem, M., Chandra, A., Livirya, A., & Beryozkina, S. (2020). AR-LaBOR: design and assessment of an augmented reality application for lab orientation. *Education Sciences, 10*(11). DOI: 10.3390/educsci10110316.

Pellas, N. (2014). The influence of computer self-efficacy, metacognitive self-regulation and self-esteem on student engagement in online learning programs: evidence from the virtual world of second life. *Computers in Human Behavior 35*. DOI: 10.1016/j.chb.2014.02.048.

Pickering, J. D., Panagiotis, A., Ntakakis, G., Athanassiou, A., Babatsikos, E., & Bamidis, P. D. (2021). Assessing the

difference in learning gain between a mixed reality application and drawing screencasts in neuroanatomy. *Anatomical Sciences Education*. DOI: 10.1002/ase.2113.

Prasetya, F., Fajri, B. F., & Ranuharja, F. (2020). Development design augmented reality-based jobsheet in CNC programming subjects. *International Journal of Innovation, Creativity and Change 10*(11).

Pregowska, A., Masztalerz, K., Garlińska, M., & Osial, M. (2021). A worldwide journey through distance education—from the post office to virtual, augmented and mixed realities, and education during the covid-19 pandemic. *Education Sciences, 11*(3).

Pringle, J. K., Stimpson, I. G., Jeffery, A. J., Wisniewski, K. D., Grossey, T., Hobson, L. et al. (2022). Extended Reality (XR) virtual practical and educational egaming to provide effective immersive environments for learning and teaching in forensic science. *Science & Justice*. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scijus.2022.04.004.

Pujiastuti, H., Haryadi, R. (2020). The use of augmented reality blended learning for improving understanding of food security in universitas sultan ageng tirtayasa: a case study." *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia, 9*(1). DOI: 10.15294/jpii.v9i1.21742.

Revianti, S. L., Anggoro, P. D. W. (2022). Interaksi kolaboratif menggunakan virtual reality berbasis web dalam pembelajaran Bahasa Inggris. *Jurnal Informatika dan Komputer*, *6*(1), : 102–14.

Richards, J. P., Done, A. J., Barber, S. R., Jain, S., Son, Y-J, Chang, E. H. (2020). Virtual coach: the next tool in functional endoscopic sinus surgery education. *International Forum of Allergy and Rhinology 10*(1). DOI: 10.1002/alr.22452.

Robinson, B. L., Mitchell, T. R., Brenseke, B. M. (2020). Evaluating the use of mixed reality to teach gross and microscopic respiratory anatomy. *Medical Science Educator, 30*(4). DOI: 10.1007/s40670-020-01064-2.

Ruiz-Cantisani, M. I., Lima-Sagui, F. D. C., Aceves-Campos, N., Ipina-Sifuentes, R., & Flores, E. G. R. (2020). Virtual reality as a tool for active learning and student engagement: industrial engineering experience. In *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON*. Vols. 2020-April.

Sample, A. (2020). Using augmented and virtual reality in information literacy instruction to reduce library anxiety in nontraditional and international students. *Information Technology and Libraries*, *39*(1). DOI: 10.6017/ITAL.V39I1.11723.

Schoeb, D. S., Schwarz, J., Hein, S., Schlager, D., Pohlmann, P. F., Frankenschmidt, A. et al. (2020). Mixed reality for teaching catheter placement to medical students: a randomized single-blinded, prospective trial. *BMC Medical Education 20*(1). DOI: 10.1186/s12909-020-02450-5.

Sekarhati, D. K. S. (2020). Tinjauan pustaka sistematik deteksi informasi palsu dan kondisinya pada media sosial Indonesia. Program Studi Magister Teknologi Informasi Fasilkom UI, Jakarta.

Shrivastava, S., Kurniawan, O., Sockalingam, N. (2022). Extended reality for enhanced learning beyond the classroom: three pandemic-proof prototypes. *SSRN Electronic Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.4026964.

Siyaev, A., Jo, G-S. (2021). Towards aircraft maintenance metaverse using speech interactions with virtual objects in mixed reality. *Sensors 21*(6). DOI: 10.3390/s21062066.

Tang, Y. M., Au, K. M., Lau, H. C. W., Ho, G. T. S., & Wu, C. H. (2020). Evaluating the effectiveness of learning design with Mixed Reality (MR) in higher education. *Virtual Reality 24*(4). DOI: 10.1007/s10055-020-00427-9.

Uhomoibhi, J., Onime, C., & Wang, H. (2020). A study of developments and applications of mixed reality cubicles and their impact on learning. *International Journal of Information and Learning Technology, 37*(1–2). DOI: 10.1108/IJILT-02-2019-0026.

Vasilevski, N., Birt, J. (2020). Analysing construction student experiences of mobile mixed reality enhanced learning in virtual and augmented reality environments. *Research in Learning Technology 28*. DOI: 10.25304/rlt.v28.2329.

Verdes, A., Navarro, C., & Álvarez-Campos, P. (2021). Mobile learning applications to improve invertebrate zoology online teaching. *Invertebrate Biology, 140*(1). DOI: 10.1111/ivb.12321.

Zhao, S., Pan, Q., Gao, D., & Cheng, J. (2022). Integrating internet of things and mixed reality to teach performance-based architectural design: a case study of shading devices. *Education and Information Technologies*. DOI: 10.1007/s10639-022-10998-6.

PENGAMBILAN KEPUTUSAN MULTI KRITERIA MENGGUNAKAN *N-SOFT ROUGH SETS*

MULTI-CRITERIA DECISION MAKING USING N-SOFT ROUGH SETS

Fatia Fatimah

Program Studi Matematika, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

fatia@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Indonesia terus berupaya untuk mempercepat inovasi berkelanjutan menuju masyarakat 5.0 agar dapat diimplementasikan di berbagai bidang. Oleh karena itu, diperlukan peran seluruh lapisan masyarakat untuk mewujudkan misi tersebut sesuai dengan bidang masing-masing. Salah satu kebaruan dalam rumpun keilmuan matematika yaitu penemuan teori N-soft set. Teori ini telah banyak digunakan oleh peneliti mancanegara dalam berbagai bidang kajian keilmuan dan implementasi praktis dalam kehidupan sehari-hari. N-soft rough set merupakan salah satu pengembangan teori N-soft set pada bidang soft computing. N-soft rough set menggabungkan dua teori yaitu N-soft set dan rough set. Model ini didasari atas kebutuhan untuk menangani masalah ketidakkonsistenan keputusan berdasarkan data yang diperoleh. Data keputusan diamati dari evaluasi yang diberikan kepada beberapa alternatif objek berdasarkan multi kriteria dimana penilaian dalam bentuk peringkat. Artikel ini bertujuan untuk mengulas prosedur pengambilan keputusan multi kriteria dengan menggunakan pendekatan N-soft rough sets. Setiap tahapan algoritma dijelaskan detil dengan harapan dapat menjadi acuan bagi pengguna model pengambilan keputusan atau peneliti lain yang berminat dalam pengembangan lebih lanjut. Disamping itu, penjabaran setiap langkah algoritma diperlukan untuk bedah kritis terhadap penerapan algoritma N-soft rough set pada artikel asal.

Kata Kunci: *multi kritera, N-soft sets, N-soft rough sets, pengambilan keputusan*

ABSTRACT

Indonesia continues striving to accelerate sustainable innovation towards society 5.0 so that it can be implemented in various fields. Therefore, it is necessary for the role of all levels of society to realize this mission according to their respective fields. One of the novelties in the mathematical scientific is the discovery of the N-soft set theory. This theory has been widely used by foreign researchers in various scientific studies and practical implementations. The N-soft rough set is one of the developments of the N-soft set theory in soft computing. The N-soft rough set combines two theories, i.e., the N-soft set and the rough set. This model can deal with inconsistent decisions based on the data obtained. Decision data is observed from rating evaluations given to several alternative objects based on multi-criteria. This article reviews the multi-criteria decision-making procedure using the N-soft rough sets approach. We explain every step of the algorithm in detail. Thus, it can be a reference for users of decision-making models or other researchers interested in further research developments. In addition, a detailed explanation is essential to criticize the results of applying the N-soft rough set algorithm in the original article.

Keywords: *multi-criteria, N-soft sets, N-soft rough sets, decision making*

PENDAHULUAN

Jepang mengusulkan visi *Society* 5.0 sejak tahun 2017. Society 5.0 merupakan model komunitas masyarakat berorientasi pada memenuhi kebutuhan manusia dengan cara menyeimbangkan kemajuan ekonomi dalam penyelesaian masalah-masalah sosial melalui sistem *online* dan *offline* yang sangat terintegrasi. Sementara Indonesia hingga saat ini terus berupaya menyelaraskan berbagai kegiatan di hampir setiap bidang dalam rangka mempercepat inovasi berkelanjutan menuju *Society 5.0* atau masyarakat 5.0. Agar Indonesia dapat beradaptasi terhadap perubahan dunia, maka masyarakat Indonesia diharapkan berperan untuk turut serta berpikir kreatif dan inovatif pada bidang masing-masing. Hasil kreativitas dan inovasi memunculkan kebaruan ide yang berdampak positif terhadap komunitas keilmuan dan dapat membawa nama baik Indonesia di kancah internasional.

Teori *N-soft set* merupakan salah satu temuan mahasiswa Indonesia program doktor matematika yang mampu mencuri perhatian peneliti mancanegara khususnya dalam hal pengambilan keputusan yang melibatkan data *uncertainty*. Hal ini dikarenakan, *N-soft set* mampu memfasilitasi berbagai tipe data penilaian (Fatimah, Rosadi, Hakim, & Alcantud, 2018). *N-soft set* juga memberikan ruang kepada peneliti serumpun dan lintas bidang untuk mengembangkan berbagai ide kebaruan terhadap definisi yang sudah ada dan diimplementasikan dalam berbagai kajian.

Saat ini, penelitian *N-soft sets* lebih banyak pada pengembangan teori, diantaranya adalah kombinasi *N-soft sets* dengan berbagai teori seperti *fuzzy N-soft sets* dan perluasannya (Adeel, Akram, Yaqoob, & Chammam, 2020; Akram, Adeel, & Alcantud, 2018; Akram, Adeel, & Alcantud, 2019b; Akram, Amjad, & Davvaz, 2021; Fatimah, & Alcantud, 2021; Kamacı & Saqlain, 2021; Mahmood, Ur Rehman, & Ali, 2021; Rehman & Mahmood, 2021; Zhang, Jia-Hua, & Yan, 2020), *hesitant N-soft sets* (Akram, Adeel, & Alcantud, 2019a; Akram & Adeel, 2019; Fatimah, 2020), *vague N-soft sets* (Chen, Liu, Chen, & Zhang, 2020; Liu, Chen, Chen, & Zhang, 2020), *neutrosophic N-soft sets* (Akram, Shabir, & Ashraf, 2021; Ashraf & Butt, 2021; Riaz, Naeem, Zareef, & Afzal, 2020),

topologi dan struktur aljabar dari *N-soft sets* (Kamaci, 2020; Kamaci & Petchimuthu, 2020; Riaz, Çağman, Zareef, & Aslam, 2019; Riaz, Razzaq, Aslam, & Pamucar, 2021), serta kombinasi *N-soft sets* dengan *rough sets* (Alcantud, Feng, & Yager, 2019; Zhang, Li, & An, 2021).

Penerapan *N-soft sets* dalam mengatasi berbagai masalah pengambilan keputusan ditunjukkan pada beberapa penelitian berikut: *N-soft sets* untuk data tidak lengkap (Fatimah, 2018), *big data* (Fatimah, 2021a, 2021b), reduksi parameter (Akram, Ali, Alcantud, & Fatimah, 2020), pariwisata (Fatimah, & Andriyansah, 2020), dan pemilihan suara (Fatimah, Rosadi, Hakim, Alcantud, 2017).

Dalam kehidupan sehari-hari manusia selalu dihadapkan pada situasi untuk mengambil keputusan baik untuk kepentingan pribadi, atau kelompok. Namun demikian, pengambilan keputusan tidak selalu mudah untuk dilakukan karena banyak alternatif, kriteria, pertimbangan, dan ragam penilaian. Teori keputusan seperti dikutip dalam Render, Stair Jr, Hanna, dan Hale (2018) merupakan pendekatan analisis dan sistematis untuk mempelajari pengambilan keputusan yang secara umum didasari pada enam proses keputusan yaitu masalah terdefinisi dengan baik, terdapat daftar alternatif yang menjadi pertimbangan, kemungkinan hasil atau kondisi dapat teridentifikasi dengan jelas, daftar setiap kombinasi alternatif dengan hasil, pilih model pengambilan keputusan yang sesuai, dan terakhir terapkan model yang dipilih dan buat keputusan.

Sementara itu, pengambil keputusan terkadang berhadapan dengan banyaknya alternatif objek, multi kriteria, dan beragam tujuan yang diperoleh. Analisis multi kriteria merupakan prosedur pengambilan keputusan yang membandingkan sekumpulan tindakan dengan mempertimbangkan secara komprehensif peringkat setiap tindakan sesuai dengan kriteria yang ditentukan sebelumnya (Gal, Stewart, & Hanne, 2013).

Salah satu model baru yang menawarkan alternatif solusi dalam mengatasi inkonsistensi pada analisis keputusan dengan multi kriteria adalah *N-soft rough sets*. Pada artikel ini akan dibahas terkait penerapan *N-soft rough sets* dalam pengambilan keputusan.

PEMBAHASAN

Filosofi penemuan *N-soft sets* didasarkan pada perlunya untuk merepresentasikan penilaian sejumlah berhingga peringkat dengan pendekatan parameterisasi sesuai kebutuhan atau preferensi setiap manusia sehingga bentuk penilaian tidak selalu harus biner, atau dalam rentang antara 0 dan 1, namun dapat dalam bentuk berhingga angka. Bahkan evaluasi yang diberikan tidak terbatas dalam bentuk angka saja tetapi juga dapat dalam bentuk simbol maupun kalimat.

Beberapa contoh nyata dalam kehidupan sehari-hari yang dapat direpresentasikan menggunakan *N-soft sets* disajikan pada gambar-gambar di atas. Gambar 1. merupakan peringkat yang diberikan oleh kritikus film. Nama kritikus dan medianya dapat dilihat pada keterangan di atas kolom dan judul film yang dinilai disajikan pada kolom paling kiri. Tanda penilaian jika dikonversi kedalam bentuk angka maka nilainya adalah 0, 1, 2, 3, 4, dan 5. Beberapa data ada yang kosong atau tidak lengkap.

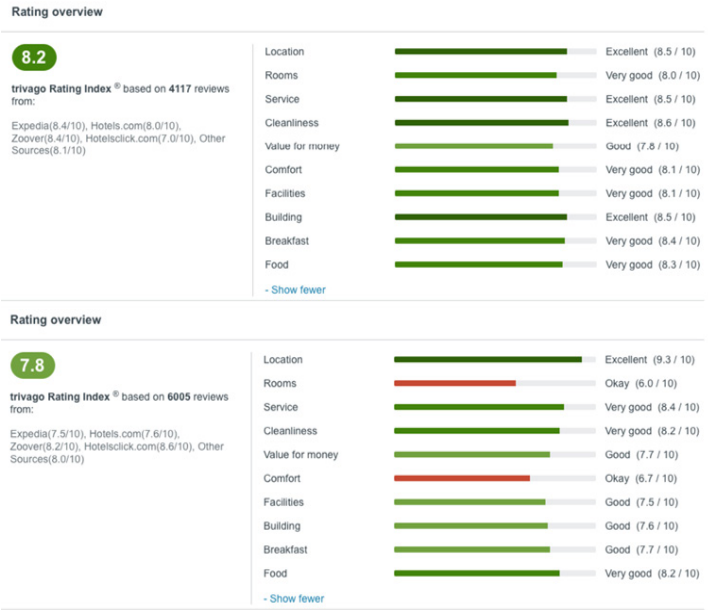
LAS MEJORES	EL MUNDO	EL PAÍS	GUIA DEL OCIO	DISCMEDI.COM	ABC	CAHIERS	CINEMANIA	FOTOGRAMAS	CINEYTEATRO.ES
★★★★★ OBRA MAESTRA ★★ INTERESANTE ★★★★ MUY BUENA ★ REGULAR ★★★ BUENA ● MALA	F. MARINERO A. LUCHINI LUIS MARTÍNEZ	JAVIER OCAÑA	ROBERTO FIORINI	JOSÉ MARÍA ARESTÉ	CORTIJO RODRÍGUEZ MARCHANTE	CARLOS F. HEREDERO	CARLOS MARAÑÓN	TONI ULLED	MARIA JOSE ALAIZ LERCHUNDI
1 SING STREET	★★★★★			★★★★					★★★★
2 TARDE PARA LA IRA	★★★★	★★★★	★★★	★★★	★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★
3 KUBO Y LAS DOS CUERDAS MÁGICAS	★★★★		★★★★★	★★★	★★★★	★★★★			★★★★
4 ELLE	★★★★★			★★★		★★★★			★★★
5 EL HOMBRE DE LAS MIL CARAS	★★★★	★★★★		★★★	★★★	★★★	★★★★	★★★★	★★★★
6 EL HOGAR DE MISS PEREGRINE	★★★★	★★		★★★★					★★★★
7 CAFÉ SOCIETY	★★★★	★★★★	★★	★★★	★★★	★★★★	★★★★		★★★★
8 NERUDA	★★★★★	★★★	★★★	★★	★★★	★★★★		★★★★	★★★
9 SPARROWS	★★★		★★	★★★★	★★★		★★★★	★★★★	★★★
10 EL PORVENIR	★★		★★★★		★★★★	★★★			
11 FLORENCE FOSTER JENKINS	★★★		★★★★	★★★	★★★				★★★
12 ESCUADRÓN SUICIDA	★★		★★★		★★★		★★★	★★★★	★★★★
13 CAPTAIN FANTASTIC	★				★★★★	★★★			★★★★
14 NO RESPIRES	★★★	★★★	★★★		★★★				★★★
15 MASCOTAS	★★★	★★	★★				★★★		★★★★★
16 CIGÜEÑAS	★★								★★★★
17 JUEGO DE ARMAS	★★★		★★	★★★	★★★				★★★★
18 SUBURRA	★★★		★	★★	★★★		★★★★	★★★	★★★★
19 LA RECONQUISTA	★★★		★★★	★★★		★★★			★★
20 EL TIEMPO DE LOS MONSTRUOS	★★★★		★★			★★			★★★
21 LA VACA	★★						★★★		★★★
22 LOS SIETE MAGNÍFICOS	★★			★★★	★★		★★★		★★★
23 LOS HOMBRES LIBRES DE JONES	★	★★★	★★★		★★★		★★★	★★★	★★
24 LA ESTACIÓN DE LAS MUJERES	★★★		●	★★	★★★	★★★	★★★★	★★	★★
25 BRIDGET JONES' BABY	★				★★★				★★★

CONFECCIONADA MEDIANTE LOS JUICIOS DE LOS CRÍTICOS QUE FIGURAN EN EL ENCABEZAMIENTO. EL ORDEN DE LAS PELÍCULAS SE ESTABLECE SEGÚN LA MEDIA ARITMÉTICA DE LAS ESTRELLAS RECIBIDAS Y DEL NÚMERO DE CRÍTICOS QUE LAS VALORAN

Sumber: Fatimah et al. (2018)

Gambar 1. Hasil Pemeringkatan Film oleh Pakar

Gambar 2. menyajikan peringkat hotel pada *website* Trivago yang merupakan kumpulan *review* dari pengguna hotel untuk berbagai kriteria seperti lokasi, ruangan, layanan, kebersihan, harga, kenyamanan, fasilitas, bangunan, sarapan pagi, dan makanan. Gambar 3. merupakan contoh penilaian konsumen pada *website* Amazon dengan memberikan tanda bintang. Di Indonesia, penggunaan peringkat dengan tanda bintang lazim dilakukan oleh konsumen dalam memberikan evaluasi terhadap produk atau layanan.



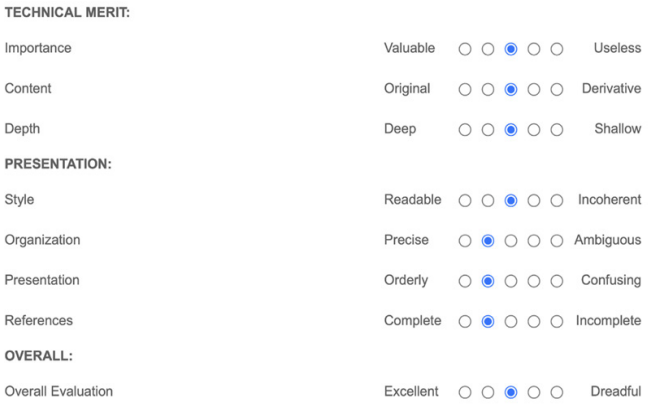
Sumber: Alcantud et al. (2019)

Gambar 2. Peringkat Hotel pada *Website* www.trivago.co.uk

Sumber: Alcantud et al. (2019)

Gambar 3. Penilaian Konsumen pada *Website* www.amazon.com

Gambar 4. merupakan penilaian kelayakan manuskrip oleh reviewer pada jurnal yang diterbitkan oleh IEEE dengan menggunakan skala 4. Kriteria pertama yaitu keunggulan teknis meliputi indikator kepentingan (tidak berguna sampai sangat berguna), isi (terapan hingga kebaruan), dan kedalaman manuskrip (dangkal hingga dalam). Kriteria kedua yaitu penyajian tulisan meliputi indikator gaya penulisan (kacau hingga dapat dibaca), organisasi (ambigu sampai pada jelas), presentasi (meragukan sampai pada sistematis), dan referensi (tidak lengkap hingga lengkap). Penilaian manuskrip secara keseluruhan dengan rentang nilai sangat jelek hingga sangat bagus.



Sumber: Alcantud (2022)

Gambar 4. Penilaian Artikel oleh Reviewer pada Jurnal di IEEE

Selanjutnya, definisi matematis *N-soft sets* disajikan pada Definisi 1 berikut.

Definisi 1. Misalkan *U* menyatakan semesta objek dan *Q* himpunan atribut, $A \subseteq Q$. Misalkan $G = \{0,1,\ldots,N-1\}$ merupakan himpunan peringkat terurut dengan $N \in \{2,3,\ldots\}$. *N-soft set* atas *U*, inotasikan dengan, didefinisikan sebagai hasil pemetaan $F : A \to 2^{U \times G}$ untuk setiap $q \in A$ terdapat secara tunggal $(u, g_q) \in U \times G$ sedemikian sehingga $(u, g_q) \in F(q), u \in U, g_q \in G$ (Fatimah dkk., 2018).

Misalkan $U = \{u_i \mid i = 1,2,\ldots,m\}$ dan $A = \{q_j \mid j = 1,2,\ldots,n\}$ merupakan himpunan berhingga maka -soft set dapat direpresentasikan dalam bentuk tabular seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. *N-Soft Set*

(F,A,N)	q_1	q_2	...	q_n
u_1	r_{11}	r_{12}	...	r_{1n}
u_2	r_{21}	r_{22}	...	r_{2n}
...	...	...	...	...
u_m	r_{m1}	r_{m2}	...	r_{mn}

Sumber: Fatimah dkk. (2018)

Definisi 2. Misalkan *U* menyatakan himpunan semesta dan $X \subseteq U$. $S = (F,A,N)$ menyatakan *N-soft set* atas *U* dan *threshold* dinotasikan sebagai $0 \le t < N$. Untuk setiap $q \in A$, himpunan yang berasosiasi dengan *S* dan *t* dinotasikan sebagai $f(q,t^{\geq})$ dengan $f : q \to 2^U$ yang didefinisikan sebagai berikut: $f(q,t^{\geq}) = \{u_i \in U \mid F(q)(u_i) \geq t\}$ (Zhang dkk., 2021).

Dengan kata lain $f\left(q,t^{\leq}\right)=-f\left(q,\left(t+1\right)^{\geq}\right)$ sehingga $f\left(q,\left[t,k\right]\right)=f\left(q,t^{\geq}\right)\cap f\left(q,k^{\leq}\right)$ dengan $0\leq t<k<N$. Selanjutnya, $f\left(A,t^{\geq}\right)=\cap_{q\in A}f\left(q,t^{\geq}\right)$ dan $f^{*}\left(A,t^{\geq}\right)=\cup_{q\in A}f\left(q,t^{\geq}\right)$.

Definisi 3. Misalkan $R=\left(U,S,N\right)$ notasi untuk *N-soft rough approximation space*. Untuk setiap subset $X\subseteq U$ didefinisikan beberapa sifat sebagai berikut.

1. *N-soft rough R-lower approximation*
   $\underline{L}_{R}\left(X,A,t\right)=\left\{u\in U:\exists q\in A,\left[u\in f\left(q,t^{\geq}\right),u\in f\left(q,t^{\geq}\right)\subseteq X\right]\right\}.$

2. *N-soft rough R-upper approximation*
   $\overline{L}_{R}\left(X,A,t\right)=\left\{u\in U:\exists q\in A,\left[u\in f\left(q,t^{\geq}\right),u\in f\left(q,t^{\geq}\right)\cap X\neq\varnothing\right]\right\}.$

3. *N-soft rough R-positive region*
   $\mathrm{POS}_{R}\left(X,A,t\right)=\underline{L}_{R}\left(X,A,t\right).$

4. *N-soft rough R-negative region*
   $\mathrm{NEG}_{R}\left(X,A,t\right)=-\overline{L}_{R}\left(X,A,t\right).$

5. *N-soft rough R-boundary region*
   $\mathrm{Bnd}_{R}\left(X,A,t\right)=\overline{L}_{R}\left(X,A,t\right)-\underline{L}_{R}\left(X,A,t\right).$

6. *N-soft rough definable set*
   Jika $\underline{L}_{R}\left(X,A,t\right)=\overline{L}_{R}\left(X,A,t\right)$ sehingga $\mathrm{Bnd}_{R}\left(X,A,t\right)=\varnothing.$

7. *N-soft R-rough set*
   Jika $\underline{L}_{R}\left(X,A,t\right)\neq\overline{L}_{R}\left(X,A,t\right)$ sehingga $\mathrm{Bnd}_{R}\left(X,A,t\right)\neq\varnothing$ (Zhang dkk., 2021).

Untuk setiap $X\subseteq U$ dan *threshold* $0\leq t<N$ diketahui bahwa $\underline{L}_{R}\left(X,A,t\right)\subseteq X$ dan $\underline{L}_{R}\left(X,A,t\right)\subseteq\overline{L}_{R}\left(X,A,t\right)$.

Contoh 1. Misalkan $U=\{u_i \mid i=1,2,3,4\}$ himpunan semesta dan $Q=C\cup\{d\}$ dengan $A=\{q_1,q_2,q_3,d\}\subseteq Q$. Misalkan $S=(F,A,3)$ merupakan 4-*soft set* atas *U* seperti direpresentasikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. $(F,A,3)$ Contoh 1

(F,A,3)	q_1	q_2	q_3	d
u_1	0	0	0	0
u_2	1	1	0	2
u_3	0	0	1	1
u_4	0	1	0	1

Misalkan $R=(U,S,3)$ merupakan 3-*soft rough approximation space*. Berdasarkan Tabel 2 diperoleh informasi bahwa:

$f(q_1,1^{\geq})=\{u_2\}$,
$f(q_2,1^{\geq})=\{u_1,u_4\}$, dan
$f(q_3,1^{\geq})=\{u_3\}$.

Misalkan $X_1=f(d,1^{\leq})$ maka $X_1=\{u_3,u_4\}$. Berdasarkan Definisi 3 tentang *N-soft rough R-lower approximation* dan *N-soft rough R-upper approximation* diperoleh hasil sebagai berikut.

$$\underline{L}_R(X_1,A,1)=\left\{u\in U:\exists q\in A,\left[u\in f(q,1^{\geq}),u\in f(q,1^{\geq})\subseteq X_1\right]\right\}=\{u_3,u_4\}.$$

$$\overline{L}_R(X_1,A,1)=\left\{u\in U:\exists q\in A,\left[u\in f(q,1^{\geq}),u\in f(q,1^{\geq})\cap X_1\neq\varnothing\right]\right\}=\{u_1,u_3,u_4\}$$

Kemudian, misalkan $X_2=f(d,2^{\leq})$ maka $X_2=\{u_2,u_3,u_4\}$. Dengan cara yang sama maka diperoleh hasil $\underline{L}_R(X_2,A,1)=\{u_2,u_3\}$, dan $\overline{L}_R(X_2,A,1)=\{u_1,u_2,u_3,u_4\}$. Karena $\underline{L}_R(X_1,A,1)\neq\overline{L}_R(X_1,A,1)$ dan $\underline{L}_R(X_2,A,1)\neq\overline{L}_R(X_2,A,1)$ maka X_1 dan X_2 merupakan 3-*soft rough set*. Hal ini menunjukkan bahwa *N-soft rough set* tidak bersifat

tunggal dikarenakan 3-*soft rough set* terdiri dari dua kemungkinan yaitu X_1 dan X_2 seperti dijelaskan di atas. Contoh penerapan *N-soft rough set* tidak tunggal dijelaskan pada bagian selanjutnya yaitu pengambilan keputusan *N-soft rough set*.

1. Pengambilan keputusan menggunakan *N-soft rough set*

Pada sesi ini akan dibahas pengambilan keputusan multi kriteria dengan atribut keputusan tunggal. Algoritma 1 merujuk pada Zhang dkk. (2021) yang menyajikan pendekatan distribusi reduksi untuk informasi tidak konsisten. Reduksi bertujuan untuk memperoleh atribut esensial berdasarkan klasifikasi. Selanjutnya, berdasarkan *N-soft rough R-lower approximation* dan *N-soft rough R-upper approximation* dipilih objek optimal.

Algoritma 1:

a. Input sistem informasi $I_d^{\geq} = U, C \cup \{d\}, V, \varphi$ yang memuat *N-soft rough set*.

b. Atribut keputusan tunggal $\{d\}$ dengan induksi partisi objek *U* ke dalam berhingga kelas keputusan $Cl = \{Cl_t, t \in T\}$, $T = \{0, \ldots, N-1\}$ sedemikian sehingga $u \in U$ merupakan anggota unik dari kelas $Cl_t \in Cl$. Untuk semua $u_i \in Cl_t$ memiliki peringkat *t* yang sama dengan $t \in T$.

c. Misalkan $C = C_1 \cup C_2 \cup \ldots \cup C_n$ dengan $C_i \cap C_j = \varnothing$, $(1 \leq i, j \leq n)$ dan kriteria C_i memilih $t_i^{\geq} (0 \leq t_i < N)$.

d. Temukan himpunan reduksi. Jika terdapat $RED_{Cl} \subseteq C_i$ maka $C_i = RED_{Cl}$. Reduksi relatif sistem informasi merupakan *subset* dari atribut yang mempunyai sifat klasifikasi yang sama atau mirip sebagai bagian dari himpunan semesta atribut kondisi. Berikut beberapa langkah untuk mendapatkan distribusi reduksi dari sistem informasi terurut tidak konsisten. Langkah 4 dibagi menjadi beberapa sub Langkah.

Sub langkah 4.1.
Untuk $A \subseteq C$, hitung fungsi distribusi $\mu_A^{\geq}(u)$ dari himpunan kriteria *A*. Misalkan $R_A^{\geq}, R_d^{\geq}$ relasi dominan dari himpunan *A* dan atribut keputusan *d*. Untuk $u_i, u_j \in U$. Tentukan:

$$U / R_A^{\geq} = \left\{ \left[u_i \right]_A^{\geq} \mid u_i \in U \right.$$

$$U / R_A^{\geq} = \left\{ D_0, D_1, D_2, \ldots, D_{N-1} \right\},$$

$$\mu_A^{\geq}(u_i) = \left(\frac{\left| D_0 \cap \left[u_i \right]_A^{\geq} \right|}{|U|}, \frac{\left| D_1 \cap \left[u_i \right]_A^{\geq} \right|}{|U|}, \frac{\left| D_2 \cap \left[u_i \right]_A^{\geq} \right|}{|U|}, \ldots, \frac{\left| D_{N-1} \cap \left[u_i \right]_A^{\geq} \right|}{|U|} \right),$$

dengan $\left[u_i \right]_A^{\geq} = \left\{ u_j \in U \mid (u_i, u_j) \in R_A^{\geq} \right\}$, $D_i = \left\{ \left[u_i \right]_d^{\geq} \mid u_i \in U \right\}$ dan $|U|$ adalah jumlah elemen dalam sistem informasi terurut tak konsisten.

Sub langkah 4.2.
Berdasarkan fungsi distribusi $\mu_A^{\geq}(u)$ pada Langkah 4.1., tentukan

$$D_{\mu\geq}^{*} = \left\{ (u_i, u_j) \mid \mu_A^{\geq}(u_i) \geq \mu_A^{\geq}(u_j) \right\},$$

dan

$$D_{\mu\geq}(u_i, u_j) = \begin{cases} \left\{ q \in A : F(q)(u_i) > F(q)(u_j) \right\}, & (u_i, u_j) \in D_{\mu\geq}^{*}, \\ 0, & (u_i, u_j) \notin D_{\mu\geq}^{*}. \end{cases}$$

Sub langkah 4.3.
Misalkan $M_{\mu\geq} = \left(D_{\mu\geq}(u_i, u_j), u_i, u_j \in U \right)$ menyatakan distribusi matriks *discernibility*. Tentukan

$$F_{\mu}^{\geq} = \wedge \left\{ \vee \left\{ q_k \mid q_k \in D_{\mu\geq}(u_i, u_j) \right\}, u_i, u_j \in U \right\}$$

$$= \wedge \left\{ \vee \left\{ q_k \mid q_k \in D_{\mu\geq}(u_i, u_j) \right\}, u_i, u_j \in D_{\mu\geq}^{*} \right\}$$

$F_{\mu}^{\geq}$ disebut formula *discernibility* dari distribusi *discernibility*.

e. Tentukan himpunan *lower approximation* $\underline{L}_R\left(X,C_i,t_i\right)$ dan *upper approximation* $\overline{L}_R\left(X,C_i,t_i\right)$.

f. Himpunan elemen optimal dinyatakan sebagai $O=\bigcup_{C_i\subseteq C,t_i\in[0,N)}\underline{L}_R\left(X,C_i,t_i\right)$ dan kemungkinan elemen optimal ditentukan dengan . $P=\bigcup_{C_i\subseteq C,t_i\in[0,N)}\overline{L}_R\left(X,C_i,t_i\right)$

Selanjutnya dijabarkan secara rinci penerapan Algoritma 1 pada Zhang dkk. (2021) dan ditemukan beberapa bedah kritis yang berbeda dengan artikel aslinya. Perhatikan analisis penyelesaian Contoh 2 berikut.

Contoh 2. (Zhang dkk., 2021). Misalkan $U=\{u_1,u_2,\ldots,u_6\}$ menyatakan himpunan rumah dan menyatakan kriteria rumah $C=\{q_1,q_2,\ldots,q_5\}\subseteq Q$ yang disyaratkan oleh pembeli dengan q_1 merepresentasikan "konfigurasi darurat", q_2 menyatakan "kualitas layanan properti komunitas", q_3 merupakan notasi untuk kriteria rumah berada pada "lingkungan hijau", q_4 menyatakan "harga", dan kriteria terakhir yaitu q_5 merepresentasikan "lokasi geografis". Nilai atribut yang diberikan oleh pakar disajikan pada Tabel 3 dimana semakin besar angka pada kolom bermakna semakin tinggi nilai yang diperoleh untuk rumah pada kriteria yang menjadi pengamatan. Makna angka berturut-turut mulai dari 0 sampai 4 sebagai berikut. 0 menyatakan sangat jelak, 1 bermakna jelek, 2 artinya sedang, 3 menyatakan bagus, dan 4 merupakan nilai tertinggi yaitu sangat bagus. Tujuan dari pengambilan keputusan pada contoh ini adalah untuk menentukan rumah optimal bagi pembeli dengan menggunakan pendekatan *N-soft rough sets*.

Tabel 3. Penilaian Pakar pada Contoh 2

U	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	d
u_1	2	2	1	1	2	3
u_2	4	2	2	2	2	2
u_3	2	1	2	2	1	1
u_4	3	1	3	4	3	2
u_5	4	3	2	3	3	3
u_6	4	2	3	4	3	1

Berdasarkan Algoritma 1, masalah pada Contoh 2 diselesaikan melalui prosedur sebagai berikut.

Langkah 1. Input sistem informasi $I_d^{\geq}$. Seperti ditunjukkan pada Tabel 3, dapat direpresentasikan dalam bentuk 5-soft sets.

Langkah 2. Misalkan atribut keputusan *d*. Misalkan *U* dikelompokkan menjadi Cl_1, Cl_2, Cl_3 berdasarkan perbedaan peringkat. Kemudian dipilih $X = Cl_2^{\geq} = D_2 = \{u_1, u_2, u_4, u_5\}$.

Langkah 3. Bagi kriteria *C* kedalam tiga bagian. Misalkan $C = C_1 \cup C_2 \cup C_3$ dan $C_1 = \{q_1\}$, $C_2 = \{q_2, q_4, q_5\}$, $C_3 = \{q_3\}$. Misalkan untuk $q \in C_1$, dipilih elemen yang mendapat peringkat $4^{\geq}$, untuk $q \in C_2$ dipilih elemen dengan peringkat $3^{\geq}$, dan $q \in C_3$ dipilih elemen dengan peringkat $2^{\geq}$.

Langkah 4. Temukan himpunan hasil reduksi dengan detil tahapan dijabarkan pada sub Langkah 4.1 sampai 4.3.

Sub Langkah 4.1. Tentukan fungsi distribusi $\mu_A^{\geq}(u)$.

Berdasarkan Tabel 3, perhatikan hubungan berikut:

i. Apakah untuk setiap q_j, angka u_j selalu lebih besar u_1 atau sama dengan angka pada baris u_1? Hasilnya sebagai berikut:

- Untuk q_1 diketahui $u_2 \geq u_1, u_3 \geq u_1, u_4 \geq u_1, u_5 \geq u_1, u_6 \geq u_1$.
- Untuk q_2 diketahui $u_2 \geq u_1, u_3 < u_1, u_4 < u_1, u_5 \geq u_1, u_6 \geq u_1$.
- Untuk q_3 diketahui $u_2 \geq u_1, u_3 \geq u_1, u_4 \geq u_1, u_5 \geq u_1, u_6 \geq u_1$.
- Untuk q_4 diketahui $u_2 \geq u_1, u_3 \geq u_1, u_4 \geq u_1, u_5 \geq u_1, u_6 \geq u_1$.
- Untuk q_5 diketahui $u_2 \geq u_1, u_3 < u_1, u_4 \geq u_1, u_5 \geq u_1, u_6 \geq u_1$.

sehingga diperoleh $\left[u_1\right]_C^{\geq} = \{u_1, u_2, u_5, u_6\}$.

ii. Apakah untuk setiap q_j, angka u_j selalu lebih besar atau sama dengan angka pada baris u_2? Hasilnya sebagai berikut:

- Untuk q_1 diketahui $u_1 < u_2, u_3 < u_2, u_4 < u_2, u_5 \geq u_2, u_6 \geq u_2$.
- Untuk q_2 diketahui $u_1 \geq u_2, u_3 < u_2, u_4 < u_2, u_5 \geq u_2, u_6 \geq u_2$.
- Untuk q_3 diketahui $u_1 < u_2, u_3 \geq u_2, u_4 \geq u_2, u_5 \geq u_2, u_6 \geq u_2$.
- Untuk q_4 diketahui $u_1 < u_2, u_3 \geq u_2, u_4 \geq u_2, u_5 \geq u_2, u_6 \geq u_2$.
- Untuk q_5 diketahui $u_1 \geq u_2, u_3 < u_2, u_4 \geq u_2, u_5 \geq u_2, u_6 \geq u_2$.

sehingga diperoleh $\left[u_2\right]_C^{\geq} = \{u_2, u_5, u_6\}$.

iii. Apakah untuk setiap q_j, angka u_j selalu lebih besar atau sama dengan angka pada baris u_3? Hasilnya sebagai berikut:

- Untuk q_1 diketahui $u_1 \geq u_3, u_2 \geq u_3, u_4 \geq u_3, u_5 \geq u_3, u_6 \geq u_3$.
- Untuk q_2 diketahui $u_1 \geq u_3, u_2 \geq u_3, u_4 \geq u_3, u_5 \geq u_3, u_6 \geq u_3$.
- Untuk q_3 diketahui $u_1 < u_3, u_2 \geq u_3, u_4 \geq u_3, u_5 \geq u_3, u_6 \geq u_3$.
- Untuk q_4 diketahui $u_1 < u_3, u_2 \geq u_3, u_4 \geq u_3, u_5 \geq u_3, u_6 \geq u_3$.
- Untuk q_5 diketahui $u_1 \geq u_3, u_2 \geq u_3, u_4 \geq u_3, u_5 \geq u_3, u_6 \geq u_3$.

sehingga diperoleh $\left[u_3\right]_C^{\geq} = \{u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\}$.

iv. Apakah untuk setiap q_j, angka u_j selalu lebih besar atau sama dengan angka pada baris u_4? Hasilnya sebagai berikut:

- Untuk q_1 diketahui $u_1 < u_4, u_2 \geq u_4, u_3 < u_4, u_5 \geq u_4, u_6 \geq u_4$.
- Untuk q_2 diketahui $u_1 \geq u_4, u_2 \geq u_4, u_3 \geq u_4, u_5 \geq u_4, u_6 \geq u_4$.
- Untuk q_3 diketahui $u_1 < u_4, u_2 < u_4, u_3 < u_4, u_5 < u_4, u_6 \geq u_4$.
- Untuk q_4 diketahui $u_1 < u_4, u_2 < u_4, u_3 < u_4, u_5 < u_4, u_6 \geq u_4$.
- Untuk q_5 diketahui $u_1 < u_4, u_2 < u_4, u_3 < u_4, u_5 \geq u_4, u_6 \geq u_4$.

sehingga diperoleh $\left[u_4\right]_C^{\geq} = \{u_4, u_6\}$. Hal ini berbeda dengan artikel aslinya (Zhang dkk., 2021) yang hanya mendapatkan $\left[u_4\right]_C^{\geq} = \{u_4\}$. Berdasarkan definisi seharusnya $\left[u_4\right]_C^{\geq} = \{u_4, u_6\}$ sesuai dengan penjelasan rinci pada Langkah iv di atas.

v. Apakah untuk setiap q_j, angka u_j selalu lebih besar atau sama dengan angka pada baris u_5? Hasilnya sebagai berikut:

- Untuk q_1 diketahui $u_1 < u_5, u_2 \geq u_5, u_3 < u_5, u_4 < u_5, u_6 \geq u_5$.
- Untuk q_2 diketahui $u_1 \geq u_5, u_2 < u_5, u_3 < u_5, u_4 < u_5, u_6 < u_5$.
- Untuk q_3 diketahui $u_1 < u_5, u_2 \geq u_5, u_3 \geq u_5, u_4 \geq u_5, u_6 \geq u_5$.
- Untuk q_4 diketahui $u_1 < u_5, u_2 < u_5, u_3 < u_5, u_4 \geq u_5, u_6 \geq u_4$.
- Untuk q_5 diketahui $u_1 < u_5, u_2 < u_5, u_3 < u_5, u_4 \geq u_5, u_6 \geq u_4$.

sehingga diperoleh $\left[u_5\right]_C^{\geq} = \{u_5\}$.

vi. Apakah untuk setiap q_j, angka u_j selalu lebih besar atau sama dengan angka pada baris u_6? Hasilnya sebagai berikut:

- Untuk q_1 diketahui $u_1 < u_6, u_2 \geq u_6, u_3 < u_6, u_4 < u_6, u_5 \geq u_6$.
- Untuk q_2 diketahui $u_1 \geq u_6, u_2 \geq u_6, u_3 < u_6, u_4 < u_6, u_5 \geq u_6$.
- Untuk q_3 diketahui $u_1 < u_6, u_2 < u_6, u_3 < u_6, u_4 \geq u_6, u_5 \geq u_6$.
- Untuk q_4 diketahui $u_1 < u_6, u_2 < u_6, u_3 < u_6, u_4 \geq u_6, u_5 \geq u_6$.
- Untuk q_5 diketahui $u_1 < u_6, u_2 < u_6, u_3 < u_6, u_4 \geq u_6, u_5 \geq u_6$.

sehingga diperoleh $\left[u_6\right]_C^{\geq} = \left\{u_6\right\}$.

Hasil klasifikasi nilai keputusan sebagai berikut:

i. Klasifikasi berdasarkan nilai *d* maksimal yaitu $d_1 = d_5 = 3$. Objek yang mendapat nilai keputusan $d \geq 3$ adalah $D_0 = \left[u_1\right]_d^{\geq} = \left[u_5\right]_d^{\geq} = \left\{u_1, u_5\right\}$;

ii. Klasifikasi berdasarkan nilai *d* berikutnya yaitu $d_2 = d_4 = 2$. Objek yang mendapat nilai keputusan $d \geq 2$ adalah $D_1 = \left[u_2\right]_d^{\geq} = \left[u_4\right]_d^{\geq} = \left\{u_1, u_2, u_4, u_5\right\}$;

iii. Klasifikasi berdasarkan nilai *d* tersisa yaitu $d_3 = d_6 = 1$. Objek yang mendapat nilai keputusan $d \geq 1$ adalah $D_2 = \left[u_3\right]_d^{\geq} = \left[u_6\right]_d^{\geq} = \left\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\right\}$.

Karena jumlah objek sebanyak enam maka dinotasikan dengan $\left|U\right| = 6$. Selanjutnya dapat dihitung $\mu_A^{\geq}\left(u_i\right)$ dengan cara sebagai berikut:

i. Diketahui rumus $\mu_C^{\geq}\left(u_1\right) = \left(\frac{\left|D_0 \cap \left[u_1\right]_C^{\geq}\right|}{\left|U\right|}, \frac{\left|D_1 \cap \left[u_1\right]_C^{\geq}\right|}{\left|U\right|}, \frac{\left|D_2 \cap \left[u_1\right]_C^{\geq}\right|}{\left|U\right|} \right)$.

Dihitung:

$\left|D_0 \cap \left[u_1\right]_C^{\geq}\right| = \left|\left\{u_1, u_5\right\} \cap \left\{u_1, u_2, u_5, u_6\right\}\right| = 2$;

$\left|D_1 \cap \left[u_1\right]_C^{\geq}\right| = \left|\left\{u_1, u_2, u_4, u_5\right\} \cap \left\{u_1, u_2, u_5, u_6\right\}\right| = 3$;

$$\left|D_2 \cap \left[u_1\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1,u_2,u_3,u_4,u_5,u_6\} \cap \{u_1,u_2,u_5,u_6\}\right| = 4$$

sehingga diperoleh

$$\mu_C^{\geq}(u_1) = \left(\frac{2}{6},\frac{3}{6},\frac{4}{6}\right).$$

ii. Diketahui rumus

$$\mu_C^{\geq}(u_2) = \left(\frac{\left|D_0 \cap \left[u_2\right]_C^{\geq}\right|}{|U|},\frac{\left|D_1 \cap \left[u_2\right]_C^{\geq}\right|}{|U|},\frac{\left|D_2 \cap \left[u_2\right]_C^{\geq}\right.}{|U|}.\right.$$

Dihitung:

$$\left|D_0 \cap \left[u_2\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1,u_5\} \cap \{u_2,u_5,u_6\}\right| = 1;$$

$$\left|D_1 \cap \left[u_2\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1,u_2,u_4,u_5\} \cap \{u_2,u_5,u_6\}\right| = 2;$$

$$\left|D_2 \cap \left[u_2\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1,u_2,u_3,u_4,u_5,u_6\} \cap \{u_2,u_5,u_6\}\right| = 3$$

sehingga diperoleh

$$\mu_C^{\geq}(u_2) = \left(\frac{1}{6},\frac{2}{6},\frac{3}{6}\right).$$

iii. Diketahui rumus

$$\mu_C^{\geq}(u_3) = \left(\frac{\left|D_0 \cap \left[u_3\right]_C^{\geq}\right|}{|U|},\frac{\left|D_1 \cap \left[u_3\right]_C^{\geq}\right|}{|U|},\frac{\left|D_2 \cap \left[u_3\right]_C^{\geq}\right|}{|U|}\right).$$

Dihitung:

$$\left|D_0 \cap \left[u_3\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1,u_5\} \cap \{u_2,u_3,u_4,u_5,u_6\}\right| = 1;$$

$$\left|D_1 \cap \left[u_3\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1,u_2,u_4,u_5\} \cap \{u_2,u_3,u_4,u_5,u_6\}\right| = 3;$$

$$\left|D_2 \cap \left[u_3\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1,u_2,u_3,u_4,u_5,u_6\} \cap \{u_2,u_3,u_4,u_5,u_6\}\right| = 5$$

sehingga diperoleh
$\mu_C^{\geq}(u_3) = \left(\frac{1}{6}, \frac{3}{6}, \frac{5}{6}\right)$.

iv. Diketahui rumus

$$\mu_C^{\geq}(u_4) = \left(\frac{\left|D_0 \cap \left[u_4\right]_C^{\geq}\right|}{|U|}, \frac{\left|D_1 \cap \left[u_4\right]_C^{\geq}\right|}{|U|}, \frac{\left|D_2 \cap \left[u_4\right]_C^{\geq}\right|}{|U|} \right).$$

Dihitung:

$$\left|D_0 \cap \left[u_4\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1, u_5\} \cap \{u_4, u_6\}\right| = 0;$$

$$\left|D_1 \cap \left[u_4\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1, u_2, u_4, u_5\} \cap \{u_4, u_6\}\right| = 1;$$

$$\left|D_2 \cap \left[u_4\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\} \cap \{u_4, u_6\}\right| = 2.$$

sehingga diperoleh
$\mu_C^{\geq}(u_4) = \left(\frac{0}{6}, \frac{1}{6}, \frac{2}{6}\right)$. Hal ini berbeda dengan artikel aslinya (Zhang dkk., 2021) yang menuliskan $\mu_C^{\geq}(u_4) = \left(\frac{0}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}\right)$, sementara banyaknya $\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\} \cap \{u_4, u_6\}$ adalah 2 objek yaitu u_4 dan u_6 sehingga yang tepat adalah $\mu_C^{\geq}(u_4) = \left(\frac{0}{6}, \frac{1}{6}, \frac{2}{6}\right)$ sesuai penjelasan detil pada Langkah di

v. Diketahui rumus

$$\mu_C^{\geq}(u_5) = \left(\frac{\left|D_0 \cap \left[u_5\right]_C^{\geq}\right|}{|U|}, \frac{\left|D_1 \cap \left[u_5\right]_C^{\geq}\right|}{|U|}, \frac{\left|D_2 \cap \left[u_5\right]_C^{\geq}\right|}{|U|} \right)$$

Dihitung:

$$\left|D_0 \cap \left[u_5\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1,u_5\} \cap \{u_5\}\right| = 1;$$
$$\left|D_1 \cap \left[u_5\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1,u_2,u_4,u_5\} \cap \{u_5\}\right| = 1;$$
$$\left|D_2 \cap \left[u_5\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1,u_2,u_3,u_4,u_5,u_6\} \cap \{u_5\}\right| = 1.$$

sehingga diperoleh

$$\mu_C^{\geq}(u_5) = \left(\frac{1}{6},\frac{1}{6},\frac{1}{6}\right).$$

vi. Diketahui rumus

$$\mu_C^{\geq}(u_6) = \left(\frac{\left|D_0 \cap \left[u_6\right]_C^{\geq}\right|}{|U|},\frac{\left|D_1 \cap \left[u_6\right]_C^{\geq}\right|}{|U|},\frac{\left|D_2 \cap \left[u_6\right]_C^{\geq}\right|}{|U|}\right)$$

Dihitung:

$$\left|D_0 \cap \left[u_6\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1,u_5\} \cap \{u_6\}\right| = 0;$$
$$\left|D_1 \cap \left[u_6\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1,u_2,u_4,u_5\} \cap \{u_6\}\right| = 0;$$
$$\left|D_2 \cap \left[u_6\right]_C^{\geq}\right| = \left|\{u_1,u_2,u_3,u_4,u_5,u_6\} \cap \{u_6\}\right| = 1.$$

sehingga diperoleh

$$\mu_C^{\geq}(u_6) = \left(\frac{0}{6},\frac{0}{6},\frac{1}{6}\right).$$

Sub Langkah 4.2. Tentukan $D_{\mu\geq}^{*} = \left\{\left(u_i,u_j\right) \mid \mu_A^{\geq}(u_i) \geq \mu_A^{\geq}(u_j)\right\}$.

i. Untuk u_1, perhatikan karena diketahui:

- $\mu_C^{\geq}(u_1) = \left(\frac{2}{6},\frac{3}{6},\frac{4}{6}\right) \geq \mu_C^{\geq}(u_2) = \left(\frac{1}{6},\frac{2}{6},\frac{3}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_1) = \left(\frac{2}{6},\frac{3}{6},\frac{4}{6}\right) < \mu_C^{\geq}(u_3) = \left(\frac{1}{6},\frac{3}{6},\frac{5}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_1) = \left(\frac{2}{6},\frac{3}{6},\frac{4}{6}\right) \geq \mu_C^{\geq}(u_4) = \left(\frac{0}{6},\frac{1}{6},\frac{2}{6}\right)$

- $\mu_C^{\geq}(u_1) = \left(\frac{2}{6}, \frac{3}{6}, \frac{4}{6}\right) \geq \mu_C^{\geq}(u_5) = \left(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_1) = \left(\frac{2}{6}, \frac{3}{6}, \frac{4}{6}\right) \geq \mu_C^{\geq}(u_6) = \left(\frac{0}{6}, \frac{0}{6}, \frac{1}{6}\right)$

sehingga diperoleh $(u_1, u_2), (u_1, u_4), (u_1, u_5), (u_1, u_6)$. .

ii. Untuk u_2, perhatikan karena diketahui:

- $\mu_C^{\geq}(u_3) = \left(\frac{1}{6}, \frac{3}{6}, \frac{5}{6}\right) < \mu_C^{\geq}(u_1) = \left(\frac{2}{6}, \frac{3}{6}, \frac{4}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_2) = \left(\frac{1}{6}, \frac{2}{6}, \frac{3}{6}\right) < \mu_C^{\geq}(u_3) = \left(\frac{1}{6}, \frac{3}{6}, \frac{5}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_2) = \left(\frac{1}{6}, \frac{2}{6}, \frac{3}{6}\right) \geq \mu_C^{\geq}(u_4) = \left(\frac{0}{6}, \frac{1}{6}, \frac{2}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_2) = \left(\frac{1}{6}, \frac{2}{6}, \frac{3}{6}\right) \geq \mu_C^{\geq}(u_5) = \left(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_2) = \left(\frac{1}{6}, \frac{2}{6}, \frac{3}{6}\right) \geq \mu_C^{\geq}(u_6) = \left(\frac{0}{6}, \frac{0}{6}, \frac{1}{6}\right)$

sehingga diperoleh $(u_2, u_4), (u_2, u_5), (u_2, u_6)$.

iii. Untuk u_3, perhatikan karena diketahui:

- $\mu_C^{\geq}(u_3) = \left(\frac{1}{6}, \frac{3}{6}, \frac{5}{6}\right) < \mu_C^{\geq}(u_1) = \left(\frac{2}{6}, \frac{3}{6}, \frac{4}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_3) = \left(\frac{1}{6}, \frac{3}{6}, \frac{5}{6}\right) \geq \mu_C^{\geq}(u_2) = \left(\frac{1}{6}, \frac{2}{6}, \frac{3}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_3) = \left(\frac{1}{6}, \frac{3}{6}, \frac{5}{6}\right) \geq \mu_C^{\geq}(u_4) = \left(\frac{0}{6}, \frac{1}{6}, \frac{2}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_3) = \left(\frac{1}{6}, \frac{3}{6}, \frac{5}{6}\right) \geq \mu_C^{\geq}(u_5) = \left(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_3) = \left(\frac{1}{6}, \frac{2}{6}, \frac{3}{6}\right) \geq \mu_C^{\geq}(u_6) = \left(\frac{0}{6}, \frac{0}{6}, \frac{1}{6}\right)$

sehingga diperoleh $(u_3, u_2), (u_3, u_4), (u_3, u_5), (u_3, u_6)$

iv. Untuk u_4, perhatikan karena diketahui:

- $\mu_C^{\geq}(u_4) = \left(\frac{0}{6}, \frac{1}{6}, \frac{2}{6}\right) < \mu_C^{\geq}(u_1) = \left(\frac{2}{6}, \frac{3}{6}, \frac{4}{6}\right)$

- $\mu_C^{\geq}(u_4) = \left(\frac{0}{6}, \frac{1}{6}, \frac{2}{6}\right) < \mu_C^{\geq}(u_2) = \left(\frac{1}{6}, \frac{2}{6}, \frac{3}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_4) = \left(\frac{0}{6}, \frac{1}{6}, \frac{2}{6}\right) < \mu_C^{\geq}(u_3) = \left(\frac{1}{6}, \frac{3}{6}, \frac{5}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_4) = \left(\frac{0}{6}, \frac{1}{6}, \frac{2}{6}\right) < \mu_C^{\geq}(u_5) = \left(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_4) = \left(\frac{0}{6}, \frac{1}{6}, \frac{2}{6}\right) \geq \mu_C^{\geq}(u_6) = \left(\frac{0}{6}, \frac{0}{6}, \frac{1}{6}\right)$

sehingga diperoleh (u_4, u_6)

v. Untuk u_5, perhatikan karena diketahui:

- $\mu_C^{\geq}(u_5) = \left(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}\right) < \mu_C^{\geq}(u_1) = \left(\frac{2}{6}, \frac{3}{6}, \frac{4}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_5) = \left(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}\right) < \mu_C^{\geq}(u_2) = \left(\frac{1}{6}, \frac{2}{6}, \frac{3}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_5) = \left(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}\right) < \mu_C^{\geq}(u_3) = \left(\frac{1}{6}, \frac{3}{6}, \frac{5}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_5) = \left(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}\right) < \mu_C^{\geq}(u_4) = \left(\frac{0}{6}, \frac{1}{6}, \frac{2}{6}\right)$
- $\mu_C^{\geq}(u_5) = \left(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}\right) \geq \mu_C^{\geq}(u_6) = \left(\frac{0}{6}, \frac{0}{6}, \frac{1}{6}\right)$

sehingga diperoleh (u_5, u_6)

Akibatnya, berdasarkan sub langkah 4.2 dapat dituliskan hasil sebagai berikut.

$$D^*_{\mu\geq} = \left\{ \begin{matrix} (u_1,u_2),(u_1,u_4),(u_1,u_5),(u_1,u_6),(u_2,u_4),(u_2,u_5),(u_2,u_6), \\ (u_3,u_2),(u_3,u_4),(u_3,u_5),(u_3,u_6),(u_4,u_6),(u_5,u_6) \end{matrix} \right\}$$

Hasil $D^*_{\mu\geq}$ di atas berbeda dengan penemuan Zhang dkk. (2021). Karena dampak dari perbedaan-perbedaan yang dijelaskan sebelumnya.

Sub Langkah 4.3. Tentukan formula *discernibility* dari matriks distribusi *discernibility*

Distribusi matriks *discernibility* ditentukan dengan cara mengklasifikasikan atribut berbeda antar objek pada $D^*_{\mu\geq}$. Berdasarkan $D^*_{\mu\geq}$ dan Tabel 3 maka dapat dicari *discernibility* sebagai berikut:

i. Untuk u_1, diketahui $(u_1,u_2),(u_1,u_4),(u_1,u_5),(u_1,u_6)$. Selanjutnya bandingkan setiap atribut pada masing-masing objek tersebut. Temukan hasil perbandingan yang memenuhi syarat $q_{u_1} > q_{u_2}$, $q_{u_1} > q_{u_4}$, $q_{u_1} > q_{u_5}$, dan $q_{u_1} > q_{u_6}$.

Hasil perbandingan dapat dilihat di bawah ini:

$q_{1,u_1} = 2 \leq q_{1,u_2} = 4;$ $q_{1,u_1} = 2 \leq q_{1,u_4} = 3$

$q_{2,u_1} = 2 \leq q_{2,u_2} = 2;$ $\boldsymbol{q_{2,u_1} = 2 > q_{2,u_4} = 1}$

$q_{3,u_1} = 1 \leq q_{3,u_2} = 2;$ $q_{3,u_1} = 1 \leq q_{3,u_4} = 3$

$q_{4,u_1} = 1 \leq q_{4,u_2} = 2;$ $q_{4,u_1} = 1 \leq q_{4,u_4} = 4$

$q_{5,u_1} = 2 \leq q_{5,u_2} = 2$ $q_{5,u_1} = 2 \leq q_{5,u_4} = 3$

$q_{1,u_1} = 2 \leq q_{1,u_5} = 4;$ $q_{1,u_1} = 2 \leq q_{1,u_6} = 4$

$q_{2,u_1} = 2 \leq q_{2,u_5} = 3;$ $q_{2,u_1} = 2 \leq q_{2,u_6} = 2$

$q_{3,u_1} = 1 \leq q_{3,u_5} = 2;$ $q_{3,u_1} = 1 \leq q_{3,u_6} = 3$

$q_{4,u_1} = 1 \leq q_{4,u_5} = 3;$ $q_{4,u_1} = 1 \leq q_{4,u_6} = 4$

$q_{5,u_1} = 2 \leq q_{5,u_5} = 3$ $q_{5,u_1} = 2 \leq q_{5,u_6} = 3$

Berdasarkan hasil perbandingan yang memenuhi syarat yaitu $q_{2,u_1} > q_{2,u_4}$ maka diperoleh matriks seperti pada Tabel 4. berikut.

Tabel 4. Matriks *Discernibility* u_1

U	u_4
u_1	q_2

ii. Untuk u_2, diketahui $(u_2,u_4),(u_2,u_5),(u_2,u_6)$. Selanjutnya bandingkan setiap atribut pada masing-masing objek tersebut. Temukan hasil perbandingan yang memenuhi syarat $q_{u_2} > q_{u_4}$, $q_{u_2} > q_{u_5}$, dan $q_{u_2} > q_{u_6}$. Hasil perbandingan dapat dilihat di bawah ini.

$\boldsymbol{q}_{1,\boldsymbol{u}_2} = 4 > \boldsymbol{q}_{1,\boldsymbol{u}_4} = 3;$

$\boldsymbol{q}_{2,\boldsymbol{u}_2} = 2 > \boldsymbol{q}_{2,\boldsymbol{u}_4} = 1;$

$q_{3,u_2} = 2 \leq q_{3,u_4} = 3;$

$q_{4,u_2} = 2 \leq q_{4,u_4} = 4;$

$q_{5,u_2} = 2 \leq q_{5,u_4} = 3;$

$q_{1,u_2} = 4 \leq q_{1,u_5} = 4;$ $\quad$ $q_{1,u_2} = 4 \leq q_{1,u_6} = 4$

$q_{2,u_2} = 2 \leq q_{2,u_5} = 3;$ $\quad$ $q_{2,u_2} = 2 \leq q_{2,u_6} = 2$

$q_{3,u_2} = 2 \leq q_{3,u_5} = 2;$ $\quad$ $q_{3,u_2} = 2 \leq q_{3,u_6} = 3$

$q_{4,u_2} = 2 \leq q_{4,u_5} = 3;$ $\quad$ $q_{4,u_2} = 2 \leq q_{4,u_6} = 4$

$q_{5,u_2} = 2 \leq q_{5,u_5} = 3;$ $\quad$ $q_{5,u_2} = 2 \leq q_{5,u_6} = 3$

Berdasarkan hasil perbandingan yang memenuhi syarat yaitu $q_{1,u_2} > q_{1,u_4}$ dan $q_{2,u_2} > q_{2,u_4}$ maka diperoleh matriks *Discernibility* u_2 sebagai berikut.

Tabel 5. Matriks *Discernibility* u_2

U	u_4
u_2	q_1, q_2

iii. Untuk u_3, diketahui $(u_3,u_2),(u_3,u_4),(u_3,u_5),(u_3,u_6)$. Selanjutnya bandingkan setiap atribut pada masing-masing objek tersebut. Temukan hasil perbandingan yang memenuhi syarat $q_{u_3} > q_{u_2}, q_{u_3} > q_{u_4}, q_{u_3} > q_{u_5}$, dan $q_{u_3} > q_{u_6}$. Hasil perbandingan dapat dilihat di bawah ini:

$q_{1,u_3} = 2 \leq q_{1,u_2} = 4;$ $q_{1,u_3} = 2 \leq q_{1,u_4} = 3$

$q_{2,u_3} = 1 \leq q_{2,u_2} = 2;$ $q_{2,u_3} = 1 \leq q_{2,u_4} = 1$

$q_{3,u_3} = 2 \leq q_{3,u_2} = 2;$ $q_{3,u_3} = 2 \leq q_{3,u_4} = 3$

$q_{4,u_3} = 2 \leq q_{4,u_2} = 2;$ $q_{4,u_3} = 2 \leq q_{4,u_4} = 4$

$q_{5,u_3} = 1 \leq q_{5,u_2} = 2;$ $q_{5,u_3} = 1 \leq q_{5,u_4} = 3$

$q_{1,u_3} = 2 \leq q_{1,u_5} = 4;$ $q_{1,u_3} = 2 \leq q_{1,u_6} = 4$

$q_{2,u_3} = 1 \leq q_{2,u_5} = 3;$ $q_{2,u_3} = 1 \leq q_{2,u_6} = 2$

$q_{3,u_3} = 2 \leq q_{3,u_5} = 2;$ $q_{3,u_3} = 2 \leq q_{3,u_6} = 3$

$q_{4,u_3} = 2 \leq q_{4,u_5} = 3;$ $q_{4,u_3} = 2 \leq q_{4,u_6} = 4$

$q_{5,u_3} = 1 \leq q_{5,u_5} = 3;$ $q_{5,u_3} = 1 \leq q_{5,u_6} = 3$

Hasil perbandingan tidak ada yang memenuhi syarat.

iv. Untuk u_4, diketahui (u_4,u_6). Selanjutnya bandingkan setiap atribut pada objek tersebut. Temukan hasil perbandingan yang memenuhi syarat $q_{u_4} > q_{u_6}$. Hasil perbandingan dapat dilihat di bawah ini:

$q_{1,u_4} = 3 \leq q_{1,u_6} = 4$

$q_{2,u_4} = 1 \leq q_{2,u_6} = 2$

$q_{3,u_4} = 3 \leq q_{3,u_6} = 3$

$q_{4,u_4} = 4 \leq q_{4,u_6} = 4$

$q_{5,u_4} = 3 \leq q_{5,u_6} = 3$

Hasil perbandingan tidak ada yang memenuhi syarat.

v. Untuk u_5, diketahui (u_5, u_6). Selanjutnya bandingkan setiap atribut pada objek tersebut. Temukan hasil perbandingan yang memenuhi syarat $q_{u_5} > q_{u_6}$. Hasil perbandingan dapat dilihat di bawah ini:

$q_{1,u_5} = 4 \leq q_{1,u_6} = 4$
$\boldsymbol{q}_{2,\boldsymbol{u}_5} = 3 > \boldsymbol{q}_{2,\boldsymbol{u}_6} = 2$
$q_{3,u_5} = 2 \leq q_{3,u_6} = 3$
$q_{4,u_5} = 3 \leq q_{4,u_6} = 4$
$q_{5,u_5} = 3 \leq q_{5,u_6} = 3$

Berdasarkan hasil perbandingan yang memenuhi syarat yaitu $q_{2,u_1} > q_{2,u_4}$ maka diperoleh matriks *Discernibility* u_2 sebagai berikut.

Tabel 6. Matriks *Discernibility*

U	u_6
u_5	q_2

Gabungan semua Tabel 4. sampai Tabel 6. menghasilkan distribusi matriks *discernibility* yang dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Distribusi Matriks *Discernibility*

U	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
u_1	Ø	Ø	Ø	q_2	Ø	Ø
u_2	Ø	Ø	Ø	$q_1 q_2$	Ø	Ø
u_3	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø
u_4	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø

U	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
u_5	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	q_2
u_6	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$

Selanjutnya, berdasarkan Tabel 7 ditentukan:

$$F_{\mu}^{\geq} = q_2 \wedge (q_1 \vee q_2) = (q_2 \wedge q_1) \vee q_2$$

Terdapat dua reduksi untuk himpunan kriteria C.

$$RED_{CI}^{1} = \{q_2, q_1\};$$
$$RED_{CI}^{2} = \{q_2\}$$

sehingga diperoleh $RED_{CI}^{2} = \{q_2\} \subseteq C_2$. Akibatnya, $C_2 = \{q_2\}$.

Langkah 5. Tentukan himpunan *lower approximation* $\underline{L}_R(X, C_i, t_i)$ dan *upper approximation* $\overline{L}_R(X, C_i, t_i)$. Berdasarkan Langkah 3 dan Tabel 7. maka diperoleh hasil sebagai berikut.

$$f(q_1, 4^{\geq}) = \{u_2, u_5, u_6\}; \qquad f(q_2, 3^{\geq}) = \{u_5\}$$
$$f(q_4, 3^{\geq}) = \{u_4, u_5, u_6\}; \qquad f(q_5, 3^{\geq}) = \{u_4, u_5, u_6\}$$
$$f(q_3, 2^{\geq}) = \{u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\}$$

Berdasarkan Langkah 2 yaitu $X = \{u_1, u_2, u_4, u_5\}$ dan Langkah 5 maka himpunan aproksimasi ditentukan sebagai berikut:

i. Himpunan l*ower approximation*

- Berdasarkan definisi

$$\underline{L}_R(X, C_1, 4) = \left\{u \in U : \exists q \in C_1, \left[u \in f(q, 4^{\geq}), u \in f(q, 4^{\geq}) \subseteq \{u_1, u_2, u_4, u_5\}\right]\right\}$$

Karena $\{u_2, u_5, u_6\} \in f(q_1, 4^{\geq}) \not\subseteq \{u_1, u_2, u_4, u_5\}$ maka

$\underline{L}_R(X, C_1, 4) = \emptyset$ dan

- Berdasarkan definisi

$$\underline{L}_R(X, C_2, 3) = \left\{u \in U : \exists q \in C_2, \left[u \in f(q, 3^{\geq}), u \in f(q, 3^{\geq}) \subseteq \{u_1, u_2, u_4, u_5\}\right]\right\}$$

Perhatikan bahwa

$\{u_5\} \in f(q_2, 3^{\geq}) \subseteq \{u_1, u_2, u_4, u_5\}$,

$\{u_4, u_5, u_6\} \in f(q_5, 3^{\geq}) \not\subseteq \{u_1, u_2, u_4, u_5\}$, dan

$\{u_4, u_5, u_6\} \in f(q_4, 3^{\geq}) \not\subseteq \{u_1, u_2, u_4, u_5\}$

Karena terdapat $q_2 \in C_2$ sedemikian sehingga

$\{u_5\} \subseteq \{u_1, u_2, u_4, u_5\}$ maka $\underline{L}_R(X, C_1, 4) = \{u_5\}$

- Berdasarkan definisi,

$$\underline{L}_R(X, C_3, 2) = \left\{u \in U : \exists q \in C_3, \left[u \in f(q, 2^{\geq}), u \in f(q, 2^{\geq}) \subseteq \{u_1, u_2, u_4, u_5\}\right]\right\}$$

Karena $\{u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\} \in f(q_3, 2^{\geq}) \not\subseteq \{u_1, u_2, u_4, u_5\}$ maka

$\underline{L}_R(X, C_3, 2) = \varnothing$

ii. Himpunan *upper approximation*

- Berdasarkan definisi

$$\overline{L}_R(X, C_1, 4) = \left\{u \in U : \exists q \in C_1, \left[u \in f(q, 4^{\geq}), u \in f(q, 4^{\geq}) \cap \{u_1, u_2, u_4, u_5\} \neq \varnothing\right]\right\}$$

Karena $\{u_2, u_5, u_6\} \cap \{u_1, u_2, u_4, u_5\} \neq \varnothing$ maka

$\overline{L}_R(X, C_1, 4) = \{u_2, u_5, u_6\}$

- Berdasarkan definisi

$$\overline{L}_R(X, C_2, 3) = \left\{u \in U : \exists q \in C_2, \left[u \in f(q, 3^{\geq}), u \in f(q, 3^{\geq}) \cap \{u_1, u_2, u_4, u_5\} \neq \varnothing\right]\right\}$$

Perhatikan bahwa

$\{u_5\} \in f(q_2, 3^{\geq}) \cap \{u_1, u_2, u_4, u_5\} \neq \varnothing$,

$\{u_4, u_5, u_6\} \in f(q_5, 3^{\geq}) \cap \{u_1, u_2, u_4, u_5\} \neq \varnothing$, dan

$\{u_4, u_5, u_6\} \in f(q_4, 3^{\geq}) \cap \{u_1, u_2, u_4, u_5\} \neq \varnothing$.

Akibatnya $\overline{L}_R(X, C_2, 3) = \{u_4, u_5, u_6\}$.

- Berdasarkan definisi

$$\overline{L}_R\left(X,C_3,2\right)=\left\{u\in U:\exists q\in C_3,\left[u\in f\left(q,2^{\geq}\right),u\in f\left(q,2^{\geq}\right)\cap\left\{u_1,u_2,u_4,u_5\right\}\neq\varnothing\right]\right\}$$

Karena $\left\{u_2,u_3,u_4,u_5,u_6\right\}\in f\left(q_3,2^{\geq}\right)\cap\left\{u_1,u_2,u_4,u_5\right\}\neq\varnothing$ maka

$$\overline{L}_R\left(X,C_3,2\right)=\left\{u_2,u_3,u_4,u_5,u_6\right\}.$$

Langkah 6. Himpunan elemen optimal yaitu:

$$\begin{aligned}O&=\underline{L}_R\left(X,C_1,4\right)\cup\underline{L}_R\left(X,C_2,3\right)\cup\underline{L}_R\left(X,C_3,2\right)\\&=\varnothing\cup\left\{u_5\right\}\cup\varnothing\\&=\left\{u_5\right\}\end{aligned}$$

Himpunan kemungkinan elemen optimal adalah:

$$\begin{aligned}P&=\overline{L}_R\left(X,C_1,4\right)\cup\overline{L}_R\left(X,C_2,3\right)\cup\overline{L}_R\left(X,C_3,2\right)\\&=\left\{u_2,u_5,u_6\right\}\cup\left\{u_4,u_5,u_6\right\}\cup\left\{u_2,u_3,u_4,u_5,u_6\right\}\\&=\left\{u_2,u_3,u_4,u_5,u_6\right\}\end{aligned}$$

Dapat disimpulkan bahwa rekomendasi yang diberikan kepada pembeli adalah rumah yang kelima yaitu u_5. Hasil yang diperoleh sama dengan Zhang dkk. (2021). Namun, sebagai analisis data, sebaiknya yang diberikan atau diinformasikan dari hasil pengolahan data bukan hanya berupa angka ataupun objek saja tetapi hasil pengolahan data tersebut dapat dinarasikan sehingga lebih mudah dipahami pengambil keputusan. Dalam hal Contoh 2 maka analisis data dapat menyampaikan kesimpulan hasil pengolahan data sebagai berikut: rumah u_5 memiliki karakteristik konfigurasi darurat yang sangat bagus, kualitas layanan properti komunitas bagus, rumah tersebut cukup memiliki lingkungan yang asri dengan tanaman dan taman hijau, harga rumah bagus sesuai dengan dana yang dialokasikan pembeli, dan lokasi geografis rumah juga bagus dengan kriteria keputusan yang diberikan oleh pakar juga mendapat kategori bagus.

Subjektivitas untuk memperhitungkan preferensi pribadi dapat direpresentasikan dengan *N-soft rough sets*. Prosedur pengambilan keputusan *N-soft rough sets* dapat mengatasi masalah pengambilan keputusan multi kriteria dengan cara mereduksi berdasarkan matriks distribusi. Himpunan elemen optimal diperoleh dari himpunan gabungan *lower approximation* dan himpunan elemen optimal yang mungkin diambil dari himpunan gabungan *upper approximation*.

Algoritma 1 membatasi pada atribut keputusan tunggal dan melakukan reduksi pada himpunan objek. Pada pengembangan selanjutnya, penulis akan mengembangkan algoritma dengan keputusan jamak dan mengkombinasikan antara reduksi parameter dan reduksi objek dengan mempertimbangkan dominasi dan pembobotan. Hal ini diperlukan untuk mengakomodir keputusan dari berbagai pakar yang hasilnya memungkinkan tidak konsisten karena penilaian bersifat subjektifitas. Sementara itu, kriteria dapat sangat beragam sesuai kebutuhan dan keperluan.

KESIMPULAN

Society 5.0 merupakan komunitas masyarakat yang menyelaraskan teknologi dengan kebutuhan sehari-hari dimana layanan dalam kehidupan sosial, pendidikan, kesehatan, industri dan aspek lainnya terfasilitasi dengan baik serta terintegrasi. Penggunaan *big data*, kecerdasan buatan, robot, dan teknologi canggih lainnya dibuat untuk mempermudah manusia dan menimbulkan kenyamanan. Jepang sebagai negara maju memiliki visi untuk memimpin dan memberikan contoh terwujudnya *Society* 5.0. Ketercapaian implementasi *Society* 5.0 di negara-negara lain membutuhkan peran masyarakat secara kesulurahan. Masyarakat yang sadar akan kebutuhan teknologi untuk membuat hidup menjadi lebih baik dan dunia yang layak huni hingga sampai generasi akhir. Indonesia sebagai negara berkembang turut serta berupaya mewujudkan *Society* 5.0. Berbagai temuan kebaruan menjadi salah satu parameter kreatifitas dan inovasi masyarakat dalam mewujudkan *Society* 5.0.

N-soft sets merupakan salah satu kebaharuan dalam teori pengambilan keputusan. Salah satu perluasan teori *N-soft sets* adalah *N-soft rough sets* yang mampu mengatasi masalah pengambilan keputusan multi kriteria khususnya pada data atau informasi yang memuat keputusan tidak konsisten. Prosedur pengambilan keputusan *N-soft rough sets* pada artikel ini diulas sangat rinci agar mempermudah pengguna dalam menerapkannya sesuai kebutuhan. Hal ini diperlukan agar semakin banyak peneliti yang turut mengembangkan model baru ini.

Penelitian lanjutan yang sangat berpotensi yaitu penerapan *N-soft rough sets* pada *big data* dengan aplikasi bahasa pemrograman sehingga dapat dengan mudah langsung digunakan oleh praktisi. Selanjutnya, reduksi parameter diperlukan untuk data dalam jumlah besar. Paramater yang lebih diprioritaskan diberi bobot lebih tinggi. Implementasi *N-soft rough sets* pada rekam jejak medis menjadi perhatian publik khususnya akibat pandemi Covid 19, sehingga perlu ada penelitian lanjutan terkait hal tersebut. Kolaborasi penelitian merupakan hal yang perlu dilakukan agar temuan dalam bidang keilmuan dapat diterapkan dalam hal praktis di berbagai bidang agar manfaatnya dapat terasa lebih luas bagi masyarakat khususnya dalam rangka menciptakan masyarakat 5.0.

DAFTAR PUSTAKA

Adeel, A., Akram, M., Yaqoob, N., & Chammam, W. (2020). Detection and severity of tumor cells by graded decision-making methods under fuzzy N-soft model. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, *39*(1), 1303-1318.

Akram, M., & Adeel, A. (2019). TOPSIS approach for MAGDM based on interval-valued hesitant fuzzy N-soft environment. *International Journal of Fuzzy Systems*, *21*(3), 993-1009

Akram, M., Adeel, A., & Alcantud, J. C. R. (2018). Fuzzy N-soft sets: A novel model with applications. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, *35*(4), 4757-4771.

Akram, M., Adeel, A., & Alcantud, J. C. R. (2019a). Group decision-making methods based on hesitant N-soft sets. *Expert Systems with Applications*, *115*, 95-105.

Akram, M., Adeel, A., & Alcantud, J. C. R. (2019b). Hesitant fuzzy N-soft sets: A new model with applications in decision-making. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, *36*(6), 6113-6127.

Akram, M., Ali, G., Alcantud, J. C., & Fatimah, F. (2021). Parameter reductions in N-soft sets and their applications in *decision-making*. *Expert Systems*, *38*(1). https://doi.org/10.1111/exsy.12601

Akram, M., Amjad, U., & Davvaz, B. (2021). Decision-making analysis based on bipolar fuzzy N-soft information. *Computational and Applied Mathematics*, *40*(6), 1-39.

Akram, M., Shabir, M., & Ashraf, A. (2021). Complex neutrosophic N-soft sets: A new model with applications. *Neutrosophic Sets and Systems*, *42*, 278-301.

Akram, M., Ali, G., Alcantud, J. C. R., Fatimah, F. (2020). Parameter reductions in N-soft sets and their applications in decision-making. Expert Systems, 38(1), 1-15.

Alcantud, J. C. R. (2022). The semantics of N-soft sets, their applications, and a coda about three-way decision. *Information Sciences*, 606, 837-852.

Alcantud, J. C. R., Feng, F., & Yager, R. R. (2019). An N-soft set approach to rough sets. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, *28*(11), 2996-3007.

Ashraf, A., & Butt, M. A. (2021). Extension of TOPSIS method under single-valued neutrosophic N-soft environment. *Neutrosophic sets and systems*, *41*, 286-303

Chen, Y., Liu, J., Chen, Z., & Zhang, Y. (2020). Group decision-making method based on generalized Vague N-soft sets. In *2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 4010-4015. IEEE.

Fatimah, F. (2020). Pengambilan keputusan multi hesitant N-soft sets. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi)*, *4*(6), 1110-1116.

Fatimah, F., (2018). *Book Chapter. Pengambilan keputusan incomplete N-Soft Sets pada data untuk mengukur indikator sustainable development goals.* Judul Buku: Peran Matematika, Sains, dan Teknologi dalam Mencapai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan, Universitas Terbuka, 209-228.

Fatimah, F. (2021a). *Book Chapter. N-Soft Sets: Tantangan dalam Riset Big Data.* Judul Buku: Science and Technology for Society 5.0, Universitas Terbuka,1-23.

Fatimah, F. (2021b). N-Soft Sets: Literature Review and Research Potential. In Conference Proceeding: The 1st International Seminar of Science and Technology for Society Development ISST 2021, 27-39.

Fatimah, F., & Andriyansah (2020). Analisis Fasilitas Pariwisata Menggunakan Prosedur Pengambilan Keputusan N-Soft Set. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi)*, *4*(1), 135-141.

Fatimah, F., & Alcantud, J.C.R. (2021). The multi-fuzzy *N*-soft set and its applications to decision-making. *Neural Computing & Applic*ation, 33(17), 11437-11446.

Fatimah, F., Rosadi, D., Hakim, RB. F., Alcantud, J. C. R. (2017). A Social Choice Approach to Graded Soft Sets, *2017 IEEE International Conference on Fuzzy Systems* (FUZZ-IEEE), 1-6. doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2017.8015428.

Fatimah, F., Rosadi, D., Hakim, R.B.F., & Alcantud, J. C. R. (2018). *N*-soft sets and their decision making algorithms. *Soft*

Computing, 2, 3829–3842. https://doi.org/10.1007/s00500-017-2838-6

Gal, T., Stewart, T., & Hanne, T. (Eds.). (2013). *Multicriteria decision making: advances in MCDM models, algorithms, theory, and applications* (Vol. 21). Springer Science & Business Media

Kamaci, H. (2020). Introduction to N-soft algebraic structures. *Turkish Journal of Mathematics*, *44*(6), 2356-2379.

Kamacı, H., & Petchimuthu, S. (2020). Bipolar N-soft set theory with applications. *Soft Computing*, *24*(22), 16727-16743.

Kamacı, H., & Saqlain, M. (2021). n-ary fuzzy hypersoft expert sets. *Neutrosophic Sets and Systems*, *43*, 180-211.

Liu, J., Chen, Y., Chen, Z., & Zhang, Y. (2020). Multi-attribute decision making method based on neutrosophic vague N-soft sets. *Symmetry*, *12*(5), 853.

Mahmood, T., Ur Rehman, U., & Ali, Z. (2021). A novel complex fuzzy N-soft sets and their decision-making algorithm. *Complex & Intelligent Systems*, 1-26.

Rehman, U. U., & Mahmood, T. (2021). Picture fuzzy N-soft sets and their applications in decision-making problems. *Fuzzy Information and Engineering*, 1-33.

Render, B., Stair Jr, R. M., Hanna, M. E., Hale. T. S. (2018). *Quantitative Analysis for Management*, 13th Edition. Pearson Education India.

Riaz, M., Çağman, N., Zareef, I., & Aslam, M. (2019). N-soft topology and its applications to multi-criteria group decision making. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, *36*(6), 6521-6536.

Riaz, M., Naeem, K., Zareef, I., & Afzal, D. (2020). Neutrosophic N-soft sets with TOPSIS method for multiple attribute decision making. *Neutrosophic sets and systems*, *32*, 146-170.

Riaz, M., Razzaq, A., Aslam, M., & Pamucar, D. (2021). M-parameterized N-soft topology-based TOPSIS approach for multi-attribute decision making. *Symmetry*, *13*(5), 748.

Zhang, H., Jia-Hua, D., & Yan, C. (2020). Multi-attribute group decision-making methods based on Pythagorean fuzzy N-soft sets. *IEEE Access*, *8*, 62298-62309.

Zhang, D., Li, P. Y., & An, S. (2021). N-soft rough sets and its applications. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40, 565-573.

OPTIMASI MASALAH LOKASI FASILITAS DALAM RISET OPERASI DAN APLIKASINYA DI INDONESIA

OPTIMIZATION OF FACILITY LOCATION PROBLEM IN OPERATIONS RESEARCH AND ITS APPLICATION IN INDONESIA

Darsih Idayani

Program Studi Matematika, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

darsih@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Masalah pemilihan lokasi suatu fasilitas telah menjadi masalah klasik di Indonesia. Hingga saat ini, masalah pemilihan lokasi fasilitas masih menjadi permasalahan yang banyak diperbincangkan. Fasilitas yang dimaksud dapat berupa fasilitas publik maupun milik pribadi. Misalnya fasilitas kesehatan, keamanan, pendidikan, transportasi, pabrik, gudang, kantor cabang, dan fasilitas lainnya yang banyak dibutuhkan untuk melancarkan aktifitas masyarakat atau suatu badan usaha. Banyak hal yang menjadi hambatan atau keterbatasan dalam menentukan lokasi fasilitas, seperti banyaknya kebutuhan atau permintaan yang belum teridentifikasi, keterbatasan biaya, keterbatasan lahan, keterbatasan tenaga kerja, dan lainnya. Permasalahan tersebut membutuhkan solusi yang optimal dengan tetap memperhatikan keterbatasan yang ada. Pada bidang matematika, khususnya riset operasi, terdapat teori optimasi lokasi fasilitas yang membahas mengenai penyelesaian masalah pemilihan lokasi fasilitas. Salah satunya menggunakan Set Covering Problem (SCP) dan Maximal Covering Problem (MCP). Artikel ini membahas bagaimana optimasi pemilihan lokasi fasilitas dalam riset operasi dengan menggunakan SCP dan MCP yang dapat menyelesaikan permasalahan pemilihan lokasi fasilitas dalam berbagai bidang. Selain itu, artikel ini juga

membahas mengenai tantangan teori lokasi fasilitas dalam riset operasi untuk menyelesaikan permasalahan pemilihan lokasi fasilitas di Indonesia sebagai inovasi yang berkelanjutan menuju masyarakat 5.0. Dalam hal ini, matematika sebagai mother of science dapat menjadi jawaban dari permasalahan yang terjadi di masyarakat. 5.0 di Indonesia melalui teori lokasi fasilitas dalam riset operasi.

Kata Kunci: *lokasi fasilitas, maximal covering problem, riset operasi, set covering problem.*

ABSTRACT

The problem of facility location determination has become a classic problem in Indonesia. Recently, the problem is still widely discussed. The facilities are public or private, for example, health facilities, security facilities, transportation, educational facilities, factories, warehouses, branch offices, and other facilities that are widely needed to launch community activities or a company. Many things become constraints or limitations in determining the facility's location, i.e. the number of unidentified needs or requests, limited costs, limited land, limited labor, and others. These problems require an optimal solution while taking into account the existing constraints. In mathematics, especially operations research, a theory of facility location optimization discusses solving problems of facility location determination. One of them uses Set Covering Problem (SCP) and Maximal Covering Problem (MCP). This article outlines how to optimize facility location determination in operations research using the SCP and MCP, which can solve the problem of choosing facility locations in various fields. Furthermore, this article also discusses the challenges of facility location theory in operations research to solve the problem of facility location selection in Indonesia as a sustainable innovation toward society 5.0. Thus, mathematics, as the mother of science, can be the answer to the problems that occur in society. 5.0 in Indonesia through facility location theory in operations research.

Keywords: *facility location, maximal covering problem, operation research, set covering problem.*

PENDAHULUAN

Saat ini, masalah pemilihan lokasi suatu fasilitas telah menjadi masalah klasik di Indonesia. Penduduk yang semakin padat menjadikan kebutuhan akan fasilitas semakin tinggi. Sebagai negara yang berkembang, Indonesa seharusnya memperhatikan penentuan lokasi fasilitas yang bersifat strategis. Jika pemerintah tidak mengatur lokasi fasilitas sebuah kota sejak awal, maka tata kotanya dapat menjadi kacau dan masyarakat dapat merasa tidak terfasilitasi dengan baik. Masalah lokasi fasilitas tidak terbatas di perkotaan saja tetapi juga di pedesaan, tergantung bidang apa yang akan diprioritaskan. Fasilitas yang dimaksud dapat berupa fasilitas publik maupun milik pribadi yang banyak dibutuhkan untuk mendukung aktifitas masyarakat atau suatu badan usaha milik pribadi. Sebagai contoh adalah fasilitas kesehatan, fasilitas keamanan, fasilitas pendidikan, transportasi, pabrik, gudang, kantor cabang, dan fasilitas lainnya.

Penentuan lokasi suatu fasilitas berpengaruh terhadap nilai dari fasilitas tersebut, seperti halnya dalam pemilihan perumahan. Pepatah lama tentang perumahan menyatakan bahwa terdapat tiga faktor dalam nilai sebuah properti, yaitu lokasi, lokasi, dan lokasi (Reid & Sanders, 2019). Secara umum, masyarakat menginginkan lokasi yang dekat dengan fasilitas agar lebih mudah dalam memenuhi kebutuhan. Namun pertimbangan penentuan lokasi akan berbanding terbalik jika berkaitan dengan penentuan lokasi gudang senjata, tempat pembuangan limbah berbahaya, kilang minyak, penjara, atau bahkan saluran transmisi listrik tegangan tinggi yang justru mencari lokasi yang relatif jauh dari pemukiman (Church & Drezner, 2022).

Terdapat banyak faktor yang mempengaruhi penentuan lokasi suatu fasilitas. Faktor-faktor tersebut dapat menjadi hambatan atau dapat menjadi pendukung. Faktor-faktor yang dapat menjadi permasalahan dalam menentukan lokasi fasilitas, seperti banyaknya kebutuhan atau permintaan yang belum teridentifikasi, keterbatasan biaya, keterbatasan lahan, dan keterbatasan tenaga kerja. Permasalahan tersebut membutuhkan solusi yang optimal dengan tetap memperhatikan keterbatasan yang ada. Bagaimana memenuhi

permintaan masyarakat, namun tetap memperhatikan batasan-batasan yang ada adalah sebuah tantangan tersendiri dalam masyarakat 5.0.

Pada ilmu matematika khususnya dalam bidang riset operasi, terdapat teori optimasi lokasi fasilitas yang membahas mengenai penyelesaian masalah pemilihan lokasi fasilitas, yaitu *Set Covering Problem* (SCP) dan *Maximal Covering Problem* (MCP). SCP bertujuan untuk meminimalkan jumlah lokasi fasilitas dan menentukan lokasi yang tepat dimana dapat memenuhi setiap permintaan atau menjangkau masyarakat. Sedangkan MCP bertujuan untuk memaksimalkan jangkauan dan menentukan lokasi fasilitas yang tepat dengan jumlah lokasi fasilitas maksimal. Jadi SCP dan MCP dapat saling mendukung dalam menyelesaikan permasalahan lokasi fasilitas.

Artikel ini membahas bagaimana optimasi pemilihan lokasi fasilitas dalam riset operasi dengan menggunakan SCP dan MCP yang akan menyelesaikan permasalahan pemilihan lokasi fasilitas. Artikel ini juga membahas mengenai tantangan teori lokasi fasilitas dalam riset operasi untuk menyelesaikan permasalahan pemilihan lokasi fasilitas di Indonesia sebagai inovasi yang berkelanjutan menuju masyarakat 5.0.

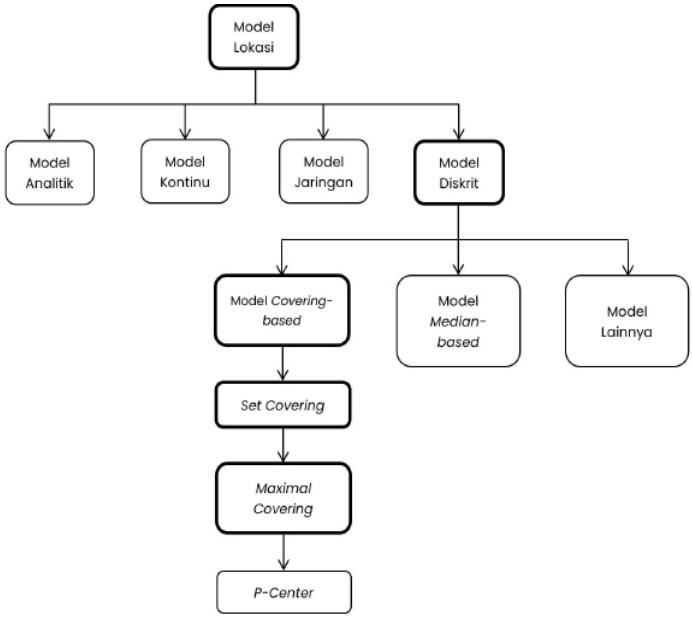
PEMBAHASAN

1. Teori Lokasi Fasilitas dan *Covering Problem*

Permasalahan lokasi fasilitas yang juga disebut dengan analisis lokasi merupakan cabang riset operasi dan geometri komputasi. Penentuan lokasi fasilitas merupakan teknik untuk pengambilan keputusan lokasi sebuah gedung atau fasilitas publik maupun milik pribadi. Reid dan Sanders (2019) mengatakan bahwa terdapat dua alasan mengapa pengambilan keputusan lokasi fasilitas menjadi sangat penting. Pertama, kebutuhan akan komitmen jangka panjang terhadap gedung atau fasilitas yang akan dibangun. Kesalahan dalam memilih lokasi sebuah gedung atau fasilitas akan sulit diperbaiki karena bersifat permanen. Kedua, keputusan pemilihan lokasi membutuhkan investasi yang besar dan mempunyai pengaruh yang besar terhadap biaya operasional dan pendapatan (Reid & Sanders, 2019).

Pada tahun 2008, Daskin mengklasifikasikan model lokasi menjadi empat model berdasarkan ruang (*space-based*), yaitu model analitik, kontinu, jaringan, dan diskrit. Selanjutnya, model diskrit dibagi menjadi tiga bagian berdasarkan fungsi objektif atau fungsi tujuannya, yaitu model berdasarkan jangkauan (*covering-based*), berdasarkan median (*median-based*), dan model lainnya (lihat Gambar 1) (Daskin, 2008). Farahani, et al. (2012) mengatakan bahwa salah satu model yang paling populer dalam model lokasi fasilitas adalah model *covering problem* atau *covering-based* (Farahani, Asgari, Heidari, Hosseininia, & Goh, 2012). *Covering problem* pertama kali diperkenalkan oleh Hakimi (Hakimi, 1965) dalam tulisannya yang berjudul "Optimum Distribution of Switching Centers in A Communication Network and Some Related Graph Theoretic Problems".

Menurut Daskin, dalam model *covering problem* terdapat jarak atau waktu jangkauan kritis dimana permintaan harus dipenuhi (Daskin, 2008). Model ini biasanya digunakan ketika merancang layanan darurat karena praktis dan dapat dimodifikasi untuk menjangkau permintaan. Perlu diperhatikan bahwa jangkauan dan layanan adalah sesuatu hal yang berbeda. Misalnya, dalam studi kasus pemilihan lokasi pos pemadam kebakaran, ada kemungkinan *node* (permintaan) tidak terjangkau (karena maksimal waktu tempuh 15 menit dari pos terdekat), tetapi permintaan di lokasi tersebut akan tetap dilayani jika berada dalam wilayah layanan (Puspitasari, & Sari, 2020; Puspitasari, & Sari, 2021). Pada model *covering problem* terdapat *set covering*, *maximal covering*, dan *P-center* (lihat Gambar 1). Artikel ini hanya membahas *set covering* dan *maximal covering*.



Sumber: Daskin, 2008

Gambar 1. Gambaran Umum Model Lokasi Fasilitas

a. Set Covering Problem (SCP)

Model *Set Covering Problem* (SCP) digunakan untuk menentukan lokasi fasilitas dengan jumlah minimum untuk menjangkau setiap permintaan. Masing-masing *node* permintaan (misalnya tiap kecamatan, kabupaten, atau provinsi) mempunyai paling tidak satu fasilitas yang dibangun atau ditempatkan dalam jarak atau waktu tempuh maksimal yang telah ditentukan sebelumnya (Laporte, Nickel, & da Gama, 2015; ReVelle, Williams, & Boland, 2002). Jarak atau waktu tempuh tersebut bergantung pada permasalahan yang akan diselesaikan. Contohnya adalah jarak atau waktu tempuh maksimal dalam kasus pemilihan lokasi pos pemadam kebakaran berbeda dengan jarak atau waktu tempuh maksimal dalam kasus pemilihan lokasi fasilitas kesehatan seperti ambulans atau lokasi puskesmas.

Pada model SCP terdapat fungsi objektif (*objective function*) yang secara umum merupakan tujuan dalam membuat keputusan. Fungsi objektif dalam SCP mempunyai tujuan meminimalkan jumlah fasilitas dan menentukan dimana lokasi yang optimal sehingga dapat meminimalkan biaya pembangunan atau biaya operasional tetapi dapat melayani secara maksimal (memenuhi setiap permintaan) dengan mempertimbangkan beberapa kendala yang ada. Kendala-kendala ini diformulasikan dalam fungsi kendala (*constraints*). Kendala dalam model sangat bervariasi tergantung permasalahan yang diangkat. Sebagai contoh pada masalah penentuan lokasi pos pemadam kebakaran memiliki kendala yaitu jumlah kejadian kebakaran dan jumlah pos kebakaran yang diinginkan di setiap kecamatan (Idayani et al., 2020). Selain itu, untuk memastikan bahwa variabel-variabel keputusan berupa bilangan biner, yaitu {0,1}, maka harus didefinisikan juga dalam pemodelannya.

Fungsi objektif maupun fungsi kendala mempunyai variabel-variabel keputusan (*decision variables*) yang saling terkait antara satu dengan yang lainnya. Variabel-variabel ini yang akan merepresentasikan node permintaan atau lokasi yang ditentukan setelah proses optimasi selesai, misalkan kecamatan, kota, dan provinsi. Formulasi SCP adalah sebagai berikut (Aktaş, Özaydin, Bozkaya, Ülengin, & Önsel, 2013).

Fungsi objektif

$$\min Z = \min \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_k x_{jk}$$

dengan kendala

$$\sum_{j \in N_i} \sum_{k \in K} r_k x_{jk} \geq f_i, \qquad \forall i \in I$$

$$\sum_{k \in K} x_{jk} \leq 1, \qquad \forall j \in J$$

$$x_{jk} \in \{0,1\} \qquad \forall j \in J, \forall k \in K$$

dimana

i, I = indeks dan himpunan *node* permintaan, $i \in \{1,2,\ldots,n\}$;

j, J = indeks dan himpunan calon lokasi fasilitas, $i \in \{1,2,\ldots,m\}$;

K = himpunan tipe calon fasilitas, $\{A,B,C\} \in K$;

c_k = biaya pembangunan fasilitas tipe *k*;

r_k = kapasitas fasilitas tipe *k* per tahun;

f_i = jumlah permintaan di *node i*;

d_{ij} = waktu tersingkat atau jarak terdekat yang antara *node i* dan *j*;

S = waktu atau jarak standar fasilitas yang berada di *node j* yang memenuhi untuk melayani *node i*;

N_i = himpunan *node j* dalam waktu standar *S* dengan $N_i = \{j \mid d_{ij} \leq S\};$;

x_{jk} = variabel keputusan biner (1 jika fasilitas dibuka di *node j*, 0 untuk yang lainnya).

b. *Maximal Covering Problem (MCP)*

Berbeda dengan SCP yang menentukan lokasi fasilitas dengan tujuan meminimalkan jumlah lokasi fasilitas, Model *Maximal Covering Problem* (MCP) bertujuan memaksimalkan permintaan yang dapat dijangkau atau dipenuhi. Dengan kata lain, MCP bertujuan memaksimalkan sejumlah node permintaan/ lokasi fasilitas yang dijangkau dalam jarak standar *S* (Laporte et al., 2015; ReVelle et al., 2002). Berdasarkan asumsi bahwa jumlah pos pemadam kebakaran yang akan dibuka terbatas (dinotasikan dengan *p*), MCP akan memaksimalkan jangkauan untuk mencapai pemenuhan atau jangkauan 100%.

Fungsi objektif dalam MCP mempunyai tujuan memaksimalkan jumlah fasilitas dan menentukan dimana lokasi yang optimal sehingga dapat memaksimalkan jangkauan dengan memberikan bobot pada tiap *node*/variabel yang bergantung pada prioritas yang digunakan. Misalkan variabel keputusan menotasikan kecamatan, maka prioritas yang

digunakan dapat berdasarkan jumlah penduduk, tempat-tempat strategis, atau tempat-tempat bersejarah bergantung pada pengambil keputusan akan memprioritaskan yang mana. Jadi setelah diperoleh jumlah lokasi fasilitas minimal dengan SCP dapat dilanjutkan dengan MCP untuk memaksimalkan jangkauannya.

Sama seperti SCP, dalam MCP juga mempertimbangkan beberapa kendala yang diformulasikan dalam fungsi kendala (*constraints*). Misalkan dalam masalah penentuan lokasi pos pemadam kebakaran, kendala dapat berupa tipe pos, jumlah maksimal pos kebakaran, dan pembatasan maksimal satu pos dalam satu kecamatan (Idayani et al., 2021). Selain itu, dalam model juga harus didefinisikan bahwa variabel-variabel keputusan berupa bilangan biner, yaitu {0,1}. Formulasi MCP adalah sebagai berikut (Aktaş et al., 2013).

Fungsi objektif

$$\max Z = \max \sum_{i \in I} w_i y_i$$

dengan kendala

$$\sum_{j \in N_i} \sum_{k \in K} r_k x_{jk} \geq w_i y_i, \quad \forall i \in I$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{jk} \leq p,$$

$$\sum_{k \in K} x_{jk} \leq 1, \quad \forall j \in J$$

$$x_{jk} \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J, \forall k \in K$$

$$y_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I$$

dimana

i, I = indeks dan himpunan *node* permintaan, $i \in \{1,2,\ldots,n\}$;

j, J = indeks dan himpunan calon lokasi fasilitas, $i \in \{1,2,\ldots,m\}$;

K = himpunan tipe calon fasilitas, $\{A,B,C\} \in K$;

w_i = bobot tiap *node i*;

r_k = kapasitas fasilitas tipe *k* per tahun;

f_i = jumlah permintaan di *node i*;

d_{ij} = waktu tersingkat atau jarak terdekat yang antara *node i* dan *j*;

S = waktu atau jarak standar fasilitas yang berada di *node j* yang memenuhi untuk melayani *node i*;

N_i = himpunan *node j* dalam waktu standar *S* dengan $N_i = \{j \mid d_{ij} \leq S\}$;

P = jumlah fasilitas yang akan dibuka

x_{jk} = variabel keputusan biner (1 jika fasilitas dibuka di *node j*, 0 untuk yang lainnya).

2. Perkembangan Penelitian Aplikasi Lokasi Fasilitas (SCP dan MCP)

Teori untuk menentukan lokasi fasilitas, yaitu model SCP maupun MCP telah banyak digunakan di berbagai bidang. Selanjutnya akan dibahas mengenai penelitian terkait aplikasi teori lokasi fasilitas yaitu SCP dan MCP dalam menentukan lokasi fasilitas di Indonesia dalam 5 tahun terakhir (2018-2022). Tabel 1. menunjukkan hasil pencarian dengan kata kunci "lokasi fasilitas" or "*set covering*" di Google Scholar (https://scholar.google.com/) selama 5 tahun terakhir. Penelitian yang menggunakan SCP di Indonesia cukup banyak dilakukan dalam bidang yang beragam. Dalam 5 tahun terakhir, ditemukan 28 penelitian yang berupa artikel jurnal, artikel prosiding, serta skripsi atau tugas akhir mahasiswa.

Penelitian yang menggunakan SCP yang paling banyak dilakukan adalah untuk menentukan lokasi Tempat Penampungan Sementara (TPS) sampah di Palembang, Yogyakarta, dan Bandar Lampung (Afrilia, 2021; Agustin, 2021; Aniza, 2021; Bangun et al., 2022; Eliza, 2022; Fathonah & Linarti, 2019; Octarina, Puspita, & Supadi, 2022; Octarina, Puspita, Supadi, Afrilia, & Yuliza, 2022; Puspita, Octarina, & Pane, 2018; Simanjuntak, 2022; Wibowo, 2021). SCP juga banyak digunakan di bidang kesehatan untuk menentukan lokasi IGD atau UGD di rumah sakit atau klinik di Palembang (Ariani, 2021; Fikri, 2018; Kinasih, 2020; Romelda S., 2018; Salsabila, 2020; Saragih, 2021; Sitepu, Puspita, & Romelda, 2018; Sitepu, Puspita, Lestari, Yuliza, & Octarina, 2022). Selain itu, dalam bidang transportasi SCP digunakan untuk menentukan lokasi Halte Bus *Rapid Transit* dan SPBU di Palembang (Banglades, 2018; Wibowo, 2021). Sedangkan dalam bidang telekomunikasi, SCP digunakan untuk menentukan lokasi *Base Transceiver Station* (BTS) di Semarang (Nurwidiana, Syakhroni, & Hamirudin, 2018), dalam bidang kebencanaan untuk menentukan lokasi Pos Pemadam Kebakaran di Situbondo (Idayani et al., 2020) dan di kawasan industri Sier Surabaya (Febryanto & Prihono, 2021), serta dalam bidang ketahanan pangan untuk menentukan lokasi gudang Perum Bulog di Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah (Ramadhan, 2021). Sebagai tambahan, di bidang ekonomi, SCP digunakan untuk menentukan lokasi stasiun pengisian gas alam terkompresi di Padang (Adelino & Fitri, 2021), di bidang pertahanan nasional untuk menentukan penugasan kapal patrol Angkatan laut dan pangkalan angkatan laut (Joko, Zaenal, Tjahjahnulin, & Alfi, 2020; Suharyo, Mulia S., & Ahmadi, 2018).

Tabel 1. Perkembangan Penelitian Aplikasi Set Covering Problem di Indonesia (2018-2022)

Tahun	Penulis	Tipe Dokumen	Jenis Fasilitas	Bidang	Lokasi Studi Kasus
2018	Puspita, et al.	Prosiding	TPS	Lingkungan	Palembang
2018	Sitepu, et al.	Prosiding	IGD	Kesehatan	Palembang
2018	Wibowo, et al.	Jurnal	Halte Bus Rapid Transit	Transportasi	Palembang
2018	Nurwidiana, et al.	Prosiding	*Base Transceiver Station* (BTS)	Telekomunikasi	Semarang
2018	Banglades	Skripsi	SPBU	Transportasi	Palembang
2018	Romelda S.	Skripsi	UGD	Kesehatan	Palembang
2018	Fikri	Skripsi	IGD	Kesehatan	Palembang
2018	Suharyo, et al.	Jurnal	Penugasan kapal patroli	Pertahanan nasional	Indonesia
2019	Fathonah dan Linarti	Jurnal	TPS	Lingkungan	Yogyakarta
2020	Idayani, et al.	Jurnal	Pos pemadam kebakaran	Kebencanaan	Situbondo
2020	Kinasih	Skripsi	UGD	Kesehatan	Palembang
2020	Salsabila	Skripsi	Rumah sakit dan Klinik	Kesehatan	Palembang
2020	Joko, et al.	Jurnal	Pangkalan angkatan laut	Pertahanan nasional	Indonesia
2021	Aniza	Skripsi	TPS	Lingkungan	Palembang
2021	Afrilia	Skripsi	TPS	Lingkungan	Palembang
2021	Saragih	Skripsi	Rumah sakit dan klinik	Kesehatan	Palembang
2021	Agustin	Skripsi	TPS	Lingkungan	Palembang
2021	Wibowo	Skripsi	TPS	Lingkungan	Bandar Lampung
2021	Ramadhan	Skripsi	Gudang Perum Bulog	Ketahanan pangan	DIY dan Jawa Tengah
2021	Ariani	Skripsi	UGD	Kesehatan	Palembang
2021	Febryanto dan Prihono	Jurnal	Pos pemadam kebakaran	Kebencanaan	SIER Surabaya
2021	Sitepu, et al.	Jurnal	IGD	Kesehatan	Palembang
2022	Bangun, et al.	Jurnal	TPS	Lingkungan	Palembang
2022	Simanjuntak	Skripsi	TPS	Lingkungan	Palembang

Tahun	Penulis	Tipe Dokumen	Jenis Fasilitas	Bidang	Lokasi Studi Kasus
2022	Eliza	Skripsi	TPS	Lingkungan	Palembang
2022	Octarina	Jurnal	TPS	Lingkungan	Palembang
2022	Adelino	Jurnal	Stasiun pengisian gas alam terkompresi	Ekonomi	Padang
2022	Octarina, et al.	Prosiding	TPS	Lingkungan	Palembang

Tabel 2. menunjukkan hasil pencarian dengan kata kunci "lokasi fasilitas" or "*maximal covering*" di Google Scholar (https://scholar.google.com/) selama 5 tahun terakhir (2018-2022). Penelitian terkait aplikasi MCP di Indonesia tidak sebanyak penelitian aplikasi SCP. Dalam 5 tahun terakhir terdapat 17 penelitian mengenai aplikasi MCP di Indonesia. Di bidang kesehatan, MCP digunakan untuk menentukan lokasi IGD atau UGD di Palembang dan menentukan fasilitas kesehatan untuk vaksinasi Covid-19 di Yogyakarta, serta fasilitas kesehatan di Surakarta (Fikri, 2018; Lusiantoro, Mara, & Rifai, 2022; Romelda S., 2018; Sitepu et al., 2018; Yuniaristanto, Fauzan, & Hisjam, 2019). Di bidang lingkungan tidak hanya digunakan untuk menentukan lokasi TPS, tetapi juga menentukan lokasi tempat sampah di Kecamatan Tenjo, Bogor, Jawa Barat dan saluran pengumpulan sampah *smartphone* di Yogyakarta (Amarilies, Redi, Mufidah, & Nadlifatin, 2020; Octarina et al., 2022; Puspita et al., 2018; Sari, Masruroh, & Asih, 2021; Utami, Purwani, & Linarti, 2019). Sama seperti SCP, aplikasi MCP juga dilakukan di bidang kebencanaan untuk menentukan lokasi pos pemadam kebakaran di Situbondo (Idayani et al., 2021). Di bidang transportasi, digunakan untuk menentukan tempat pemberhentian monorail di Surabaya dan tempat parkir penyewaan sepeda di Monumen Nasional (Amarilies, Kamil, & Adzkia, 2020; Ardiansyah & Mardlijah, 2019). Selanjutnya, di bidang pendidikan, MCP digunakan untuk menentukan lokasi SMP dan MTs di Surakarta (Wiseka, Yuniaristanto, & Hisjam, 2018). Selain itu, penentuan sektor regulator di Depok dan gudang tembakau di Sumenep menggunakan MCP sebagai aplikasi di bidang ekonomi (Olivia, Sekar, & Lusiani, 2021; Winarso & Rohim, 2019).

Tabel 2. Perkembangan Penelitian Aplikasi *Maximal Covering Problem* di Indonesia (2018-2022)

Tahun	Penulis	Tipe Dokumen	Jenis Fasilitas	Bidang	Lokasi Studi Kasus
2018	Sitepu, et al.	Prosiding	IGD	Kesehatan	Palembang
2018	Fikri	Skripsi	IGD	Kesehatan	Palembang
2018	Puspita, et al.	Prosiding	TPS	Lingkungan	Palembang
2018	Romelda S.	Skripsi	UGD	Kesehatan	Palembang
2018	Wiseka	Jurnal	SMP dan MTs	Pendidikan	Surakarta
2019	Ardiansyah dan Mardlijah	Prosiding	Pemberhentian *monorail*	Transportasi	Surabaya
2019	Amarilies, et al.	Prosiding	Parkir penyewaan sepeda	Transportasi	Monumen nasional
2019	Winarso dan Rohim	Prosiding	Gudang tembakau	Ekonomi	Sumenep
2019	Yuniaristanto	Prosiding	Fasilitas kesehatan	Kesehatan	Surakarta
2019	Utami, et al.	Jurnal	TPS	Lingkungan	Yogyakarta
2020	Amarilies, et al.	Prosiding	Tempat sampah	Lingkungan	Tenjo, Bogor, Jawa Barat
2021	Olivia, et al.	Jurnal	*Regulator* sektor	Ekonomi	Depok
2021	Idayani, et al.	Prosiding	Pos pemadam kebakaran	Kebencanaan	Situbondo
2021	Sari, et al.	Jurnal	Saluran pengumpulan sampah *smartphone*	Lingkungan	Yogyakarta
2021	Hartini, et al.	Prosiding	Pusat pengumpulan sampah cooking *oil*	Lingkungan	Semarang
2022	Lusiantoro, et al.	Jurnal	Fasilitas kesehatan untuk vaksinasi	Kesehatan	Yogyakarta
2022	Octarina	Jurnal	TPS	Lingkungan	Palembang

3. Tantangan Riset Masalah Lokasi Fasilitas

Berdasarkan beberapa literatur yang dibahas sebelumnya, masih banyak bidang yang belum tersentuh teori lokasi fasilitas seperti bidang industri, ketahanan pangan, pendidikan di daerah 3T (tertinggal, terluar, dan terdepan), dan pendidikan jarak jauh. Beberapa bidang yang sudah menggunakan teori lokasi fasilitaspun masih belum menyeluruh penggunaannya seperti bidang transportasi dan kesehatan. Padahal jika menerapkan teori lokasi fasilitas secara komprehensif akan dapat mendukung pembangunan di Indonesia sebagai inovasi berkelanjutan.

Tantangan teori lokasi fasilitas dalam riset operasi, khususnya SCP dan MCP, sebagai inovasi berkelanjutan di era masyarakat 5.0 di Indonesia adalah dapat menyelesaikan permasalahan dalam bidang industri, transportasi, kesehatan, ketahanan pangan, pendidikan, dan pendidikan jarak jauh.

a. Bidang industri

Pada bidang industri, masalah tata letak pabrik maupun tata letak fasilitas dan peralatan produksi merupakan salah satu yang berperan penting dalam peningkatan produktivitas perusahaan (Adiasa, Suarantalla, Rafi, & Hermanto, 2020). Teori lokasi fasilitas dapat digunakan untuk menentukan lokasi pabrik karena dapat mempertimbangkan jarak *material handling* dan pusat bahan mentah dalam area produksi sebagai *constraint* yang dibatasi dalam jarak tertentu. Pada pabrik dengan limbah berbahaya atau yang mengakibatkan polusi (air, udara, suara, dan polusi lainnya), perlu memperhatikan jarak dengan pemukiman penduduk. Dalam hal ini, fungsi objektifnya dapat berupa biaya dengan fungsi objektif minimisasi yang berupa model SCP. Pada model MCP, fungsi objektifnya memaksimalkan jangkauan pabrik dengan *constraint* kapasitas gudang dan permintaan konsumen. Beberapa permasalahan lain dalam bidang industri juga dapat diselesaikan, seperti pemilihan lokasi gudang penyimpanan untuk melancarkan proses distribusi, serta lokasi pengolahan limbah dengan memperhatikan jarak antara pusat pengolahan limbah dan pemukiman penduduk.

b. Bidang transportasi

Pada bidang transportasi, SCP dan MCP dapat digunakan untuk menentukan lokasi fasilitas transportasi seperti halte bus, terminal, stasiun, dan pelabuhan yang dapat menjangkau seluruh masyarakat berdasarkan kebutuhannya. Selama ini, permasalahan transportasi tidak hanya terkait dengan masalah tarif, tetapi juga karena pengembangan fasilitas transportasi umum yang berkelanjutan tidak memenuhi kebutuhan masyarakat yang sebenarnya (Aminah, 2018). Dengan model SCP, biaya pengembangan fasilitas transportasi dapat diminimumkan tetapi tetap dapat memenuhi kebutuhan masyarakat. Hal ini dapat dilengkapi oleh model MCP yang dapat memaksimalkan jangkauan dengan keterbatasan kapastitas

fasilitas transportasi. Sehingga SCP dan MCP dapat menjadi kombinasi yang tepat dalam mengoptimalkan penentuan lokasi fasilitas transportasi.

c. Bidang kesehatan

Penggunaan SCP di bidang kesehatan sudah dilakukan, diantaranya untuk penentuan lokasi vaksinasi. Namun penentuan lokasi vaksinasi tersebut belum dilakukan optimasi untuk memaksimalkan jangkauan fasilitas kesehatan. Pemaksimalan jangkauan fasilitas kesehatan dapat dilakukan dengan menggunakan model MCP. Penelitian bidang kesehatan yang menggunakan SCP ataupun MCP banyak dilakukan untuk penentuan lokasi UGD. Pengembangan penelitian di bidang kesehatan dapat juga dilakukan untuk penentuan lokasi puskesmas baru, sentra ambulans, bank darah, dan klinik terutama yang berada di daerah terpencil dengan fasilitas kesehatan yang kurang memadai. Dengan adanya penggunaan model SCP dan MCP ini, maka lokasi fasilitas kesehatan dapat ditentukan dengan jumlah minimal tetapi dapat menjangkau masyarakat secara maksimal. Hal tersebut dapat membantu masyarakat yang belum terjangkau fasilitas kesehatan, namun pemerintah tetap dapat menghemat biaya ataupun tenaga kerja. Beberapa hal yang menjadi pertimbangan dalam penentuan lokasi dan menjadi fungsi kendala adalah banyaknya orang sakit setiap tahunnya, kepadatan penduduk, akses jalan, dan keterbatasan jumlah tenaga kesehatan.

d. Bidang ketahanan pangan

Pada bidang ketahanan pangan di Indonesia, pemerintah menugaskan Perum Bulog untuk pengadaan dan pendistribusian beras oleh pemerintah (Peraturan Presiden Republik Indonesia, 2016). Pendistribusian beras diperuntukkan bagi rumah tangga miskin (raskin). Sebagian besar masyarakat miskin berada di luar Pulau Jawa terutama di daerah terpencil. Salah satu strategi agar pendistribusian beras raskin berjalan efektif di daerah-daerah terpencil adalah dengan penentuan lokasi gudang Bulog yang tepat, lokasi yang dapat menjangkau masyarakat miskin. Untuk itu, dalam penentuan lokasi gudang Bulog yang tepat dapat menggunakan SCP maupun MCP.

e. Bidang pendidikan

Permasalahan bidang pendidikan yang dapat diteliti adalah terkait pemerataan pendidikan di Indonesia. Menurut Mustari dan Rahman, salah satu masalah klasik pendidikan di Indonesia adalah belum meratanya kesempatan pendidikan (Mustari & Rahman, 2014). Salah satu penelitian terkait teori lokasi fasilitas adalah dengan menentukan lokasi sekolah yang tepat terutama di daerah 3T (tertinggal, terluar, dan terdepan), sebagai solusi permasalahan pemerataan pendidikan. Di daerah 3T, jarak tempuh dari rumah ke sekolah terlalu jauh. Kondisi jarak tempuh ini merupakan salah satu faktor utama penyebab anak putus sekolah (Hardiasanti & Trihantoyo, 2021; Masing & Astuti, 2021). Oleh sebab itu jarak sekolah satu dengan sekolah yang lain harus diatur sebelum membangun sekolah agar tidak ada anak yang putus sekolah dengan alasan tempat tinggalnya terlalu jauh dengan sekolah. Selain itu, minimnya guru di daerah 3T juga menjadi kendala dalam pemerataan pendidikan (Syafii, 2018). Terbatasnya jumlah guru menyebabkan sekolah yang sudah ada tidak dikelola dengan baik sehingga kualitas pendidikan menjadi buruk.

Pada model SCP, jarak sekolah yang satu dengan sekolah yang lain, jumlah sekolah minimal dalam satu kecamatan, dan ketersediaan guru dapat menjadi fungsi kendala (*constraints*) dengan fungsi objektif meminimalkan jumlah sekolah tetapi tetap memperhatikan kebutuhan masyarakat akan sekolah. Variabelnya dapat berupa desa atau kelurahan. Sedangkan dalam model MCP, jumlah anak usia sekolah dapat menjadi rujukan untuk menentukan bobot tiap variabel sehingga variabel (desa) dengan jumlah anak usia sekolah yang lebih banyak akan diprioritaskan dengan diberi bobot lebih besar daripada desa yang lain. Kapasitas sekolah dan terbatasnya guru yang tersedia dapat menjadi fungsi kendala dengan fungsi objektif memaksimalkan jumlah sekolah dengan tujuan untuk memaksimalkan jangkauan sekolah.

f. Bidang pendidikan jarak jauh

Menurut Permendikbud No. 109 Tahun 2013, pendidikan jarak jauh merupakan proses belajar mengajar yang dilakukan secara jarak jauh melalui berbagai media komunikasi (Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia,

2013). Media komunikasi dapat berupa media cetak (buku), media rekaman (audio, CD, VCD), media jaringan (internet), media proyeksi (film, *powerpoint*), dan media siaran (radio dan TV) (Siahaan & Rivalina, 2012). Di Indonesia, salah satu perguruan tinggi yang menerapkan sistem pendidikan jarak jauh adalah Universitas Terbuka (UT). Sebagai Perguruan Tinggi Jarak Jauh (PTJJ), UT mempunyai 39 Unit Program Belajar Jarak Jauh (UPBJJ) dan 1 Pusat Pengelolaan Mahasiswa Luar Negeri untuk melayani mahasiswa yang tersebar di seluruh Indonesia dan di luar negeri dengan baik. Minimal ada 1 UPBJJ-UT tersedia di setiap provinsi di Indonesia. Selain UPBJJ-UT, terdapat Sentra Layanan UT (SALUT) sebagai fasilitas yang disediakan untuk melayani mahasiswa yang berada di kota/ kabupaten. Pemilihan lokasi SALUT yang tepat sangat penting dilakukan agar UT dapat melayani mahasiswa di daerah dengan baik. Namun penelitian terkait penentuan lokasi SALUT belum pernah dilakukan. Dalam hal ini, SCP dan MCP dapat diaplikasikan untuk menentukan lokasi SALUT yang tepat.

Pada penggunaan SCP, dapat ditentukan lokasi SALUT dengan fungsi objektif meminimalkan jumlah SALUT sehingga dapat meminimalkan biaya tetapi tetap dapat menjangkau mahasiswa. Fungsi kendala dapat berupa terbatasnya dosen dan karyawan UT, jumlah mahasiswa (jumlah kebutuhan pelayanan) yang harus dipenuhi kebutuhannya, jarak SALUT satu ke SALUT yang lainnya, dan jumlah maksimal SALUT tiap provinsi atau daerah. Dalam hal ini, kota/kabupaten dapat menjadi variabelnya. Pada penggunaan MCP, jangkauan SALUT dapat dimaksimalkan dengan memperhatikan jumlah mahasiswa di tiap kota/kabupaten sebagai acuan menetapkan bobot tiap variabel (kota/kabupaten). Tentunya, semakin banyak jumlah mahasiswanya, semakin besar bobotnya.

KESIMPULAN

Teori lokasi fasilitas dalam riset operasi dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pemilihan lokasi fasilitas di Indonesia sebagai salah satu bentuk inovasi yang berkelanjutan menuju masyarakat 5.0. Beberapa bidang yang terkait dengan pemilihan lokasi dapat menggunakan teori ini sebagai strategi alternatif untuk mendapatkan lokasi yang tepat. Bidang-bidang tersebut antara lain bidang industri, transportasi, kesehatan, pendidikan, pendidikan jarak jauh, kebencanaan, dan ketahanan pangan. Namun perlu diperhatikan dengan baik faktor-faktor yang mempengaruhi keputusan dalam pemilihan lokasi yang dapat menjadi fungsi kendala dalam model *covering problem*. Kondisi daerah setempat dan kearifan lokal juga tidak dapat diabaikan. Beberapa skenario harus disimulasikan terlebih dahulu untuk memperoleh kondisi yang paling optimal. Dalam penggunaannya, peneliti dapat melakukan kolaborasi dengan praktisi terkait agar memperoleh pandangan dari sudut berbeda sehingga mendapatkan hasil yang maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

Adelino, M. I., & Fitri, M. (2021). Modeling combinatorial optimization of compressed natural gas filling station location using Set Covering Approach. *2021 International Conference on Computer Science and Engineering (IC2SE)*, 1–5. https://doi.org/10.1109/IC2SE52832.2021.9792056

Adiasa, I., Suarantalla, R., Rafi, M. S., & Hermanto, K. (2020). Perancangan ulang tata letak fasilitas pabrik di CV. Apindo Brother sukses menggunakan metode Systematic Layout Planning (SLP). *Performa: Media Ilmiah Teknik Industri*, *19*(2), 151–158. https://doi.org/10.20961/performa.19.2.43467

Afrilia, R. (2021). *Formulasi Set Covering Problem dan P-Mean serta aplikasi Algoritma Genetika dalam menentukan lokasi tempat pembuangan sementara (TPS) sampah di Kecamatan Seberang Ulu I dan Kecamatan Kemuning*. Universitas Sriwijaya.

Agustin, R. (2021). *Implementasi Algoritma Perticle Swarm Optimization pada penyelesaian model Set Covering Location Problem dan P-Median Problem dalam penentuan lokasi tempat pembuangan sampah optimal di Kecamatan Ilir Barat I dan Kecamatan Bukit Kecil*. Universitas Sriwijaya.

Aktaş, E., Özaydin, Ö., Bozkaya, B., Ülengin, F., & Önsel, Ş. (2013). Optimizing fire station locations for the Istanbul Metropolitan Municipality. *Interfaces*, *43*(3), 240–255. https://doi.org/10.1287/inte.1120.0671

Amarilies, H. S., Kamil, A. P., & Adzkia, H. F. (2020). Maximum coverage distance problem for dockless bike sharing system: A case study of the dockless bike sharing system in Jakarta. *The 3rd International Conference on Computers in Management and Business (ICCMB 2020)*, 306–309. https://doi.org/https://doi.org/10.1145/3383845.3383893

Amarilies, H. S., Redi, A. A. N. P., Mufidah, I., & Nadlifatin, R. (2020). Greedy heuristics for the Maximum Covering Location Problem: A case study of optimal trashcan location in Kampung Cipare – Tenjo – West Java. *The 12th ISIEM (International Seminar on Industrial Engineering & Management): "Industrial Intelligence System on Engineering, Information, and Management*, 1–8. https://doi.org/10.1088/1757-899X/847/1/012007

Aminah, S. (2018). Transportasi publik dan aksessibilitas masyarakat perkotaan. *Jurnal Teknik Sipil UBL*, *9*(1), 1142–1155.

Aniza, R. (2021). *Formulasi model Set Covering Problem dan implementasi Algoritma Greedy Heuristic dalam penentuan lokasi tempat pembuangan sementara (TPS) sampah di Kecamatan Sako dan Kecamatan Ilir Timur I*. Universitas Sriwijaya.

Ardiansyah, A., & Mardlijah. (2019). Determination of location and numbers of monorail stops in Surabaya with Max Covering Problem model. *Journal of Physics*: *Conference Series*, *1373*(1), 1–9. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1373/1/012035

Ariani, I. S. (2021). *Robust Set Cover Problem dalam penentuan lokasi optimal unit gawat darurat di Kota Palembang*. Universitas Sriwijaya.

Banglades. (2018). *Aplikasi metode Reduction Heuristic pada model Set Covering dalam menentukan lokasi SPBU di Kecamatan Kemuning Palembang*. Universitas Sriwijaya.

Bangun, P. B. J., Octarina, S., Aniza, R., Hanum, L., Puspita, F. M., & Supadi, S. S. (2022). Set Covering Model using Greedy Heuristic Algorithm to determine the temporary waste disposal sites in Palembang. *Science and Technology Indonesia*, *7*(1), 98–105. https://doi.org/10.26554/sti.2022.7.1.98-105

Church, R. L., & Drezner, Z. (2022). Review of obnoxious facilities location problems. *Computers & Operations Research*, *138*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105468

Daskin, M. S. (2008). What you should know about location modeling. *Naval Research Logistics*, *55*(4), 283–294. https://doi.org/10.1002/nav.20284

Eliza, N. A. (2022). *Penentuan lokasi tempat pembuangan sementara strategis di Kecamatan Kertapati dan Sukarami menggunakan model Set Covering Problem dan Greedy Reduction Algorithm*. Universitas Sriwijaya.

Farahani, R. Z., Asgari, N., Heidari, N., Hosseininia, M., & Goh, M. (2012). Covering problems in facility location: A review. *Computers & Industrial Engineering*, *62*(1), 368–407. https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.020

Fathonah, C. A., & Linarti, U. (2019). Penentuan open/closed fasilitas tempat pembuangan sampah dengan mempertimbangkan design fasilitas dan sarana pendidikan formal. *Limits: Journal of Mathematics and Its Applications*, *16*(1), 27–38. https://doi.org/10.12962/limits.v16i1.4947

Febryanto, I. D., & Prihono. (2021). Model jaringan rantai pasok untuk pos pemadam kebakaran di Kawasan Sier. *Tekmapro: Jurnal of Industrial Enggineering and Manajemen*, *6*(1), 25–35. https://doi.org/10.33005/tekmapro.v16i1.169

Fikri, A. (2018). *Penyelesaian Model Covering Based dalam pengoptimalan lokasi instalasi gawat darurat pada fasilitas kesehatan di Kota Palembang*. Universitas Sriwijaya.

Hakimi, S. L. (1965). Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems. *Operations Research*, *13*(3), 462–475. https://doi.org/10.1287/opre.13.3.462

Hardiasanti, M., & Trihantoyo, S. (2021). Implementasi wajib belajar di daerah terdepan, terluar, dan tertinggal. *Jurnal Inspirasi Manajemen Pendidikan*, *9*(5), 1064–1077.

Idayani, D., Puspitasari, Y., & Sari, L. D. K. (2020). Penggunaan model Set Covering Problem dalam penentuan lokasi dan jumlah pos pemadam kebakaran. *Soulmath*, *8*(2), 139–152. https://doi.org/10.25139/smj.v8i2.3280

Idayani, D., Puspitasari, Y., & Sari, L. D. K. (2021). Maximal Covering Problem model for determination of fire station location. *Proceedings of the International Conference on Innovation in Science and Technology (ICIST 2020)*, *208*(Advanced in Engineering Research), 20–23. https://doi.org/10.2991/aer.k.211129.005

Peraturan Presiden Republik Indonesia. (2016). *Peraturan Presiden Republik Indonesia nomor 48 tahun 2016 tentang penugasan kepada perusahaan umum (Perum) Bulog dalam rangka ketahanan pangan nasional*. Jakarta.

Joko, P., Zaenal, F., Tjahjahnulin, D., & Alfi, H. (2020). The model for determining location of naval base using AHP method and Set Covering Problem. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, *101*(5), 122–131. https://doi.org/10.18551/rjoas.2020-05.13

Kinasih, K. P. (2020). *Aplikasi Myopic Algorithm pada model Covering Based dalam pengoptimalan unit gawat darurat pada fasilitas kesehatan di Kota Palembang*. Universitas Sriwijaya.

Laporte, G., Nickel, S., & da Gama, F. S. (2015). *Location science*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13111-5

Lusiantoro, L., Mara, S. T. Wi., & Rifai, A. P. (2022). A locational analysis model of the COVID-19 vaccine distribution. *Operations and Supply Chain Management*, *15*(2), 240–250.

Masing, M., & Astuti, K. (2021). Putus sekolah sebagai tantangan pendidikan daerah 3T (Tertinggal, Terluar dan Terdepan). *Seminar Nasional dan Call for Paper Mahasiswa (SENACAM) 2021*, 140–148.

Mustari, M., & Rahman, M. T. (2014). *Manajemen pendidikan*. Raja Grafika Persada.

Nurwidiana, Syakhroni, A., & Hamirudin. (2018). Penentuan lokasi Base Transceive Station (BTS) bersama di Kota Semarang dengan model Set Covering Problem. *Seminar Nasional IENACO 2018*, 142–149.

Octarina, S., Puspita, F. M., & Supadi, S. S. (2022). Models and heuristic algorithms for solving discrete location problems of temporary disposal places in Palembang City. *International Journal of Applied Mathematica (IAENG)*, *52*(2).

Octarina, S., Puspita, F. M., Supadi, S. S., Afrilia, R., & Yuliza, E. (2022). Set Covering Location Problem and P-median Problem model in determining the optimal temporary waste disposal sites location in Seberang Ulu I Sub-district Palembang. *Proceedings of the 6th National Conference on Mathematics and Mathematics Education*, 020046.1-020046.10. https://doi.org/10.1063/5.0096034

Olivia, A., Sekar, H., & Lusiani, M. (2021). Analisis penempatan regulator sector jaringan gas rumah tangga berdasarkan Maximum Coverage Location Problem (Case study: Jaringan gas rumah tangga Kota Depok, Jawa Barat). *Jurnal Logistik Indonesia*, *5*(1), 24–33. https://doi.org/https://doi.org/10.31334/logistik.v5i1.1182.g607

Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia. (2013). *Peraturan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia nomor 109 tahun 2013 tentang penyelenggaraan pendidikan jarak jauh pada pendidikan tinggi*. Jakarta: Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia.

Puspita, F. M., Octarina, S., & Pane, H. (2018). Pengoptimalan lokasi tempat pembuangan sementara (TPS) menggunakan Greedy Reduction Algorithm (GRA) di Kecamatan Kemuning. *Prosiding The 4th Annual Research Seminar 2018*: *Computer Science and ICT*, 267–274.

Ramadhan, M. H. (2021). *Studi komparasi penentuan lokasi warehouse Perum Bulog dengan metode Set-covering dan P-median untuk mengoptimalkan pendistribusian beras RASKIN wilayah kerja DIY dan Jawa Tengah*. Universitas Islam Indonesia.

Reid, R. D., & Sanders, N. R. (2019). *Operations management*: *An integrated approach* (7th ed.). Wiley.

ReVelle, C. S., Williams, J. C., & Boland, J. J. (2002). Counterpart models in facility location science and reserve selection science. *Environmental Modeling and Assessment*, *7*, 71–80.

Romelda S., S. (2018). *Pengoptimalan lokasi unit gawat darurat pada rumah sakit dengan menggunakan Model Covering Based*. Universitas Sriwijaya.

Salsabila, J. (2020). *Pengoptimalan lokasi rumah sakit dan klinik yang memiliki fasilitas unit gawat darurat di Kota Palembang menggunakan Metode Greedy Reduction Algorithm*. Universitas Sriwijaya.

Saragih, W. Ii. (2021). *Implementasi Algoritma Genetika pada pengoptimalan lokasi rumah sakit dan klinik yang memiliki fasilitas UGD di Kota Palembang*. Universitas Sriwijaya.

Sari, D. P., Masruroh, N. A., & Asih, A. M. S. (2021). Extended Maximal Covering Location and Vehicle Routing Problems in designing smartphone waste collection channels: A case study of Yogyakarta Province, Indonesia. *Sustainability*, *13*(16), 1–23. https://doi.org/10.3390/su13168896

Siahaan, S., & Rivalina, R. (2012). Perkembangan pendidikan terbuka dan jarak jauh di Indonesia. *Jurnal Teknodik*, *16*(1), 59–72. https://doi.org/10.32550/teknodik.v0i0.8

Simanjuntak, P. (2022). *Formulasi model Set Covering Problem dan implementasi Algoritma Benders Decomposition pada penentuan lokasi TPS sampah di kecamatan Sukarami Kota Palembang*. Universitas Sriwijaya.

Sitepu, R., Puspita, F. M., Lestari, I., Yuliza, E., & Octarina, S. (2022). Facility location problem of dynamic optimal location of hospital emergency department in Palembang. *Science and Technology Indonesia*, *7*(2), 251–256. https://doi.org/10.26554/sti.2022.7.2.251-256

Sitepu, R., Puspita, F. M., & Romelda, S. (2018). Covering Based Model dalam pengoptimalan lokasi IGD rumah sakit. *The 4th Annual Research Seminar 2018: Computer Science and ICT*, 261–266.

Suharyo, O. S., Mulia S., O., & Ahmadi, A. (2018). Patrol Ships Assignment model in eastern area of Indonesia water using Set Covering. *International Journal of ASRO*, *9*(1), 30–36. https://doi.org/10.37875/asro.v9i1.56

Syafii, A. (2018). Perluasan dan pemerataan akses kependidikan daerah 3T (terdepan, terluar, tertinggal). *Dirasat: Jurnal Manajemen Dan Pendidikan Islam*, *4*(2), 153–171. https://doi.org/10.26594/dirasat.v4i2.1535

Utami, T. Y. P., Purwani, A., & Linarti, U. (2019). Model for determining temporary landfil facility locations with Maximal Covering by considering capacity, region and hotels (Case study at the sector of TPS Malioboro-Kranggan Yogyakarta). *Journal of Advance Recearch in Dynamical & Control System*, *11*(12), 209–2013.

Wibowo, R. A. (2021). *Implementasi Myopic Algorithm dalam penyelesaian model Set Covering penentuan lokasi tempat pembuangan sementara sampah di Kecamatan Ilir Timur II dan Ilir Barat II Kota Palembang*. Universitas Sriwijaya.

Winarso, K., & Rohim, M. I. A. (2019). Comparation of P-Median, P-Center, and Maximal Coverage on facility location problem of Bokabo tobacco supply chain, Sumenep District. *International Conference on Life, Innovation, Change, and Knowledge (ICLICK 2018)*, 183–190.

Wiseka, S. A., Yuniaristanto, & Hisjam, M. (2018). Evaluasi kapasitas dan jangkauan pelayanan fasilitas pendidikan sekolah menengah pertama dan madrasah tsanawiyah di Kota Surakarta. *PERFORMA : Media Ilmiah Teknik Industri*, *17*(1), 71–77. https://doi.org/10.20961/performa.17.1.19056

Yuniaristanto, Fauzan, M. I. R., & Hisjam, M. (2019). Assessing the coverage of health care facilities in Surakarta using the hierarchical Maximal Covering model: Case study. *The 11th Curtin University Technology, Science and Engineering (CUTSE) International Conference*, *495*, 1–7. https://doi.org/10.1088/1757-899X/495/1/012082.

PRODUK ASURANSI PERTANIAN INDEKS CURAH HUJAN UNTUK MENJAMIN KOMODITAS PERTANIAN DARI KASUS KEBANJIRAN

CROP INSURANCE PRODUCT BASED ON RAINFALL INDEX TO ENSURE AGRICULTURAL COMMODITY FROM CASE OF FLOODING

Siti Umamah Naili Muna

Program Studi Matematika, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

naili@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Curah hujan adalah salah satu unsur iklim yang tidak pasti dan berkorelasi dengan risiko kerugian pada sektor pertanian. Selain komoditas pertanian memiliki karaktertistik kebutuhan curah hujan tertentu, curah hujan dengan kategori lebat juga dapat ditemui di suatu wilayah di Indonesia. Artikel ini membahas pengembangan produk asuransi pertanian yang mengasuransikan indeks curah hujan pada lahan tadah hujan untuk menjamin petani dari risiko penurunan produktivitas suatu komoditas pertanian maupun puso atau gagal panen akibat kasus kebanjiran. Produk asuransi pertanian indeks curah hujan memuat model klaim benefit yang membagi tiga kondisi pembayaran, yaitu pembayaran penuh, sebagian, dan tidak ada pembayaran. Patokan yang membagi tiga jenis kondisi pembayaran disebut paramater indeks curah hujan (trigger dan exit). Trigger dan exit adalah kuantil dari peluang melakukan klaim benefit yang setara dengan peluang curah hujan tertentu karena asuransi ini mengasuransikan indeks curah hujan harian maksimum. Untuk menentukan peluang curah hujan harian maksimum, dilakukan studi kasus dengan data curah hujan harian maksimum di Dramaga Bogor periode bulan September sampai dengan bulan Desember (1984-2014). Distribusi Mixture Gamma 2-komponen lebih representatif dalam memodelkan curah hujan tersebut dibandingkan distribusi Burr Tipe XII. Pendugaan parameter distribusi menggunakan metode Pendugaan Maksimum Likelihood. Selanjutnya, perkalian besaran klaim benefit dengan peluangnya berimplikasi menghasilkan

rumusan premi tunggal bersih. Curah hujan harian maksimum di Dramaga Bogor berkategori curah hujan sangat lebat sehingga risiko yang dijamin cukup tinggi dan harga premi bergantung pada kesediaan perusahaan asuransi untuk menjamin risiko kerugian.

Kata Kunci: *distribusi curah hujan harian maksimum, indeks curah hujan, penduga kemungkinan maksimum, premi, produk asuransi pertanian.*

ABSTRACT

Rainfall is one of the uncertain climate elements that correlate with the risk of loss in the agriculture sector. In addition to agricultural commodities having specific characteristics of rainfall requirement, heavy rainfall can also be found in certain areas in Indonesia. This study aims to develop a crop insurance product that ensures the rainfall index on rainfed agriculture to ensure farmers from the decreasing productivity risk or crop failure due to the case of flooding. Crop insurance product based on the rainfall index contains a benefit claim model that divides three payment conditions, full payment, partial payment, and no payment. The benchmarks that divide three payment conditions are called the rainfall index parameters (trigger and exit). Trigger and exit are quantiles of the probability of claiming the benefits equivalent to the probability of certain rainfall because this insurance ensures a maximum daily rainfall index. To determine the probability of maximum daily rainfall, the case study was conducted with data on maximum daily rainfall in Dramaga Bogor from September to December (1984-2014). Two-components Gamma-Mixture distribution is more representative in modelling the rainfall than Burr type XII distribution. The Maximum Likelihood Estimation method is used to estimate the distribution parameters. Furthermore, the result of multiplying the number of benefits claimed by its probability is a single net premium formula. The maximum daily rainfall at Dramaga Bogor is very heavy-categorized so the ensured risk is relatively high, and the premium depends on the willingness of the insurance company to cover the risk of loss.

Key Words: *crop insurance product, maximum daily rainfall distribution, maximum likelihood estimation, premium, rainfall index.*

PENDAHULUAN

Sektor pertanian tadah hujan tidak terlepas dari risiko kerugian akibat perubahan iklim yang tidak dapat dikontrol oleh petani. Kerugian yang dihadapi oleh sektor pertanian tersebut dapat berupa penurunan produktivitas pertanian atau puso/ gagal panen total. Unsur iklim yang tidak dapat dipastikan jumlahnya dan berpotensi kejadian iklim ekstrim adalah curah hujan. Curah hujan ekstrim yang menurun dan meningkat secara drastis dari kondisi normal menimbulkan bencana kekeringan dan kebanjiran yang berkorelasi dengan kegagalan panen (Boer, 2012).

Era masyarakat Society 5.0 mendorong manusia untuk berkontribusi dalam memberikan solusi dari tantangan dan permasalahan ketidakpastian dengan memanfaatkan berbagai inovasi yang lahir dari perkembangan sains dan teknologi. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi risiko kerugian akibat ketidakpastian pada sektor pertanian tadah hujan yaitu dengan terus berinovasi dalam penyusunan dan pengembangan produk asuransi pertanian. Asuransi pertanian adalah alternatif alat penjamin kerugian pertanian yang secara khusus dapat digunakan oleh petani dalam melindungi produksi pertanian jika terjadi gagal panen. Asuransi pertanian yang didasarkan pertimbangan curah hujan di luar kendali petani didefinisikan dengan asuransi pertanian indeks curah hujan. Penggantian kerugian pada asuransi pertanian indeks curah hujan sama halnya dengan asuransi indeks iklim yaitu berdasarkan realisasi suatu unsur iklim yang diukur selama periode asuransi di stasiun iklim tertentu (Boer, 2012; Muna, 2017; Muna, 2019a).

Pada asuransi pertanian indeks curah hujan, peluang curah hujan tertentu berperan penting sebagai dasar penentuan peluang besar risiko kerugian yang akan ditanggung perusahaan asuransi. Peluang curah hujan tertentu diasumsikan berdistribusi seperti distribusi curah hujan tertentu masa lalu yang diperkirakan paling representatif memodelkan curah hujan tersebut. Model distribusi Burr tipe XII telah dikaji untuk memodelkan curah hujan harian maksimum satu periode tanam padi di bulan September sampai dengan bulan Desember (Muna, 2019b) dan curah

hujan harian tak nol (Papalexiou & Koutsoyiannis, 2013). Selain itu, curah hujan kumulatif satu periode tanam padi bulan Juni sampai dengan bulan Agustus representatif dimodelkan dengan distribusi *Mixture Gamma*-2 komponen (Muna, 2019a).

Besaran klaim didefinisikan pada model klaim *benefit*. Model klaim *benefit* untuk perlindungan pertanian dari kasus kekeringan terbagi menjadi tiga kondisi pembayaran, yaitu pembayaran *benefit* penuh, pembayaran *benefit* sebagian, serta tidak ada pembayaran *benefit* (Boer, 2012). Pada penelitian selanjutnya, tiga kondisi pembayaran tersebut dipartisi oleh dua parameter indeks curah hujan, yaitu *trigger* dan *exit. Trigger* adalah patokan ketika realisasi curah hujan tertentu yang kurang dari parameter ini menyebabkan penurunan produktivitas pertanian. *Exit* adalah patokan ketika realisasi curah hujan tertentu yang kurang dari parameter ini menyebabkan puso (Muna, 2017).

Artikel ini membahas pengembangan produk asuransi pertanian indeks curah hujan yang memberikan perlindungan dari kemungkinan kasus kebanjiran. Selain itu, disajikan studi kasus untuk memodelkan data curah hujan harian maksimum periode bulan September sampai Desember di Dramaga Bogor sejak tahun 1984 sampai dengan tahun 2014 yang diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) di dalam Muna (2019b) dengan distribusi Burr tipe XII dan distribusi Mixture Gamma-2 komponen. Selanjutnya, parameter masing-masing model diduga dengan metode penduga kemungkinan maksimum dan diselesaikan secara numerik dengan aplikasi *R i386 4.1.3.* Sebagai ilustrasi, diberikan beberapa contoh premi tunggal bersih pada artikel ini.

PEMBAHASAN

Produk asuransi pertanian indeks curah hujan dikembangkan dengan meninjau beberapa pustaka. Beberapa pustaka yang digunakan diantaranya adalah teori peluang, pendugaan parameter, uji kebaikan suai, dan asuransi, serta model curah hujan dan pendugaan parameter. Definisi untuk masing-masing pustaka diberikan sebagai berikut.

1. Teori Peluang

a. Peubah Acak

Misalkan $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ adalah ruang peluang (*probability triple*). Peubah acak $X = \Omega \to A$ merupakan fungsi terukur dari himpunan semua hasil yang mungkin ke ruang terukur *A*. Pada umumnya *X* bernilai real (misal $\mathrm{A} = \mathbb{R}$).
Peluang *X* dapat dituliskan sebagai berikut

$$P(X \in S) = P\left(\{\omega \in \Omega \mid X(\omega) \in S\}\right)$$

dimana $S \subseteq A$ dan *P* adalah ukuran peluang yang dilengkapi dengan Ω (McKay, 2019).

b. Fungsi Distribusi Kumulatif

Misalkan *X* merupakan peubah acak. Fungsi distribusi kumulatif didefinisikan dengan $F_X(x) = P(X \le x)$ (Hogg et al., 2014).

c. Peubah Acak Kontinu

Suatu peubah acak disebut peubah acak kontinu jika fungsi distribusi kumulatif $F_X(x)$ adalah fungsi kontinu untuk setiap $x \in \mathbb{R}$. Untuk peubah acak kontinu *X* tidak ada titik massa diskret. Sebagai contoh jika *X* kontinu $P(X = x) = 0$ maka untuk setiap $x \in \mathbb{R}$. Peubah acak terkontinu adalah kontinu sepenuhnya, yaitu $F_X(x) = \int_{-\infty}^{x} f_X(u)du$, untuk beberapa fungsi $f_X(x)$. Fungsi $f_X(x)$ disebut fungsi kepekatan peluang dari *X* (Hogg et al., 2014).

d. Nilai Harapan Distribusi Kontinu

Jika *X* merupakan peubah acak kontinu dengan fungsi kepekatan peluang $f_X(x)$ maka nilai harapan dari *X* adalah

$$\mathbb{E}(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x)dx,$$

asalkan integral tersebut konvergen mutlak (Hogg et al., 2014).

2. Pendugaan Parameter

a. Fungsi *Likelihood*

Misalkan $X_1, X_2, \ldots, X_n$ adalah barisan peubah acak yang bebas stokastik dan identik dengan fungsi kepekatan peluang $f(x;\theta)$, $\theta \in \Omega$. Fungsi kepekatan peluang bersama dari $(X_1, X_2, \ldots, X_n)$ sampel acak berukuran *n* yang dihitung pada titik pengamatan (sampel) $x_1, x_2, \ldots, x_n$ adalah

$$f(x_1, x_2, \ldots, x_n;\theta) = \prod_{i=1}^{n} f(x_i;\theta),$$

disebut fungsi *likelihood* untuk θ dan dapat dituliskan dengan $L(x;\theta)$ (Hogg et al., 2014).

b. Penduga Kemungkinan Maksimum (MLE)

Misalkan $L(x;\theta) = f(x_1, x_2, \ldots, x_n;\theta), \theta \in \Omega,$ adalah fungsi kepekatan peluang bersama dari $X_1, X_2, \ldots, X_n$. Untuk suatu titik pengamatan $x_1, x_2, \ldots, x_n$, nilai penduga kemungkinan maksimum (MLE) dari θ dinotasikan dengan $\hat{\theta}$ dan memenuhi

$$L(x;\hat{\theta}) = \max_{\theta \in \Omega} L(x;\theta).$$

Jika Ω adalah suatu interval terbuka, $L(x;\theta)$ dapat diturunkan terhadap θ, dan dapat diasumsikan mencapai maksimum pada Ω maka penduga kemungkinan maksimum untuk θ adalah suatu penyelesaian dari persamaan maksimum fungsi *likelihood* berikut

$$\frac{\partial}{\partial \theta} L(x;\theta) = 0.$$

Nilai penduga didapatkan langsung apabila persamaan turunan pertama terhadap θ membentuk persamaan yang dapat diselesaikan secara analitik. Jika persamaan yang terbentuk tidak dapat diselesaikan secara analitik maka diperlukan metode numerik untuk penyelesaiannya (Hogg et al., 2014).

3. Uji Kebaikan Suai

a. Hipotesis

Uji kebaikan suai merupakan uji untuk menunjukkan beralasan atau tidaknya asumsi data berasal dari distribusi yang spesifik. Secara matematis, kesesuain model ini diuji dengan hipotesis dan pengujian statistik. Hipotesis merupakan pernyataan tentang model distribusi suatu populasi sedangkan pengujian statistik adalah suatu proses pengambilan keputusan apakah menerima atau menolak suatu hipotesis. Bentuk pernyataan dari hipotesis nol (H_0) yaitu "data berdistribusi tertentu" dan hipotesis alternatif (H_1) yaitu "data tidak berdistribusi tertentu". Pengujian statistik umumnya mengukur seberapa dekat fungsi distribusi suatu model dengan fungsi distribusi empirik. Jika nilai statistik dari pengujian statistik terhadap distribusi tertentu lebih kecil dari nilai yang telah ditentukan sebelumnya maka keputusan menunjukkan tidak tolak hipotesis nol (H_0) dan data berdistribusi tertentu (Klugman et al., 2012).

b. Uji Kolmogorov-Smirnov (KS)

Uji Kolmogorov-smirnov digunakan untuk melihat perbedaan antara distribusi empirik dan model distribusi yang akan diuji. Distribusi empirik $F_n(x)$ didefinisikan dengan

$$F_n(x) = \frac{n_i}{n},$$

dimana i merupakan bilangan asli berhingga, n_i adalah banyaknya titik pengamatan yang lebih kecil sama dengan titik pengamatan ke-i setelah keseluruhan titik pengamatan diurutkan dari terkecil ke terbesar dan n adalah notasi dari banyaknya titik pengamatan. Distribusi kumulatif dari model distribusi yang akan diuji dilambangkan dengan F_x dan didefinisikan sebagai berikut

$$D^+ = \max_{1 \le i \le n} \left\{ \frac{i}{n} - F_x\left(x_{(i)}\right) \right\} \text{ dan } D^- = \max_{1 \le i \le n} \left\{ F_x\left(x_{(i)}\right) - \frac{i-1}{n} \right\},$$

dimana $x_{(i)}$ merupakan statistik tataan. Statistik uji K-S didefinisikan $D = \max\left(D^+, D^-\right)$. Jika nilai D lebih besar dari nilai

kritis yang ditentukan oleh tabel K-S pada taraf nyata tertentu maka model distribusi yang diuji tidak suai merepresentasikan distribusi dari data pengamatan (Klugman et al., 2012).

4. Asuransi

Dalam Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 40 Tahun 2014 tentang Usaha Perasuransian dijelaskan bahwa asuransi adalah perjanjian antara dua pihak yaitu perusahaan asuransi dan pemegang polis. Perjanjian tersebut menjadi dasar bagi penerimaan premi oleh perusahaan asuransi sebagai imbalan untuk memberikan penggantian kepada tertanggung atau pemegang polis karena kerugian, kerusakan, biaya yang timbul, kehilangan keuntungan, atau tanggung jawab hukum kepada pihak ketiga yang mungkin diderita tertanggung atau pemegang polis karena terjadinya suatu peristiwa pasti, atau memberikan pembayaran yang didasarkan pada meninggalnya tertanggung atau pembayaran yang didasarkan pada hidupnya tertanggung dengan *benefit* yang besarnya telah ditetapkan dan/atau didasarkan hasil pengelolaan dana (Undang-undang Republik Indonesia, 2014).

a. Risiko

Risiko adalah potensi kerugian yang ditimbulkan akibat bencana pada suatu wilayah dan kurun waktu tertentu berupa kematian, luka, sakit, jiwa terancam, hilangnya rasa aman, jumlah orang mengungsi, kerusakan atau kehilangan harta dan infrastruktur, dan gangguan kegiatan masyarakat secara sosial dan ekonomi (BNPB, 2013).

b. Premi Asuransi

Premi (P) adalah pembayaran dana dari pemegang polis kepada perusahaan asuransi sebagai imbalan jasa atas pengalihan risiko terhadap perusahaan asuransi (Marsidah, 2020).

c. Klaim

Klaim adalah suatu pernyataan hak untuk pembayaran, sebagai contoh seorang pemegang polis memberi informasi kerugian perusahaan dari produk yang rusak dan percaya bahwa kerugian tersebut memberikan ganti rugi (Widagdo & Lestari, 2018).

d. *Benefit*

Benefit (*b*) adalah jumlah manfaat yang wajib dibayarkan oleh perusahaan asuransi untuk setiap periode asuransi. Besarnya *benefit* (*b*) ditentukan di awal secara pasti dan diketahui nilainya karena digunakan sebagai acuan untuk menentukan berbagai penghitungan aktuaria (Silviastuti, 2013).

5. Model Curah Hujan dan Pendugaan Parameternya

Curah hujan adalah ketinggian air hujan yang terkumpul dalam tempat yang datar, tidak menguap, tidak meresap dan tidak mengalir. Berdasarkan informasi yang diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG), tinggi curah hujan satu milimeter sama dengan jumlah air hujan sebanyak satu liter dalam luasan satu meter persegi (1mm = 1liter/m^2). Curah hujan dicatat secara kontinu oleh stasiun curah hujan dan tidak dapat ditentukan secara pasti jumlahnya sehingga curah hujan merupakan peubah acak kontinu.

Menurut Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, curah hujan harian dapat diklasifikasikan menjadi lima jenis, yaitu curah hujan sangat ringan untuk curah hujan harian yang kurang dari 5 mm, curah hujan ringan untuk curah hujan harian sebesar 5-20 mm, curah hujan sedang untuk curah hujan harian sebesar 21-50 mm, curah hujan lebat untuk curah hujan harian sebesar 51-100 mm, dan curah hujan sangat lebat untuk curah hujan harian yang lebih besar dari 100 mm (BMKG, 2022).

Pemodelan curah hujan melibatkan dua fungsi distribusi untuk menduga distribusi yang paling representatif dan mendekati distribusi empirik dari data curah hujan tertentu di masa lalu. Pemodelan dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu 1) pemilihan model distribusi, 2) kalibrasi model distribusi, 3) validasi model distribusi, 4) mempertimbangkan model distribusi lain, 5) seleksi model distribusi terbaik dan 6) modifikasi model distribusi untuk diaplikasikan (Klugman, 2012).

a. Pemilihan Model Distribusi dan Pendugaan Parameter

Pemilihan model distribusi dimulai dari persiapan data sesuai indikator yang digunakan. Dalam artikel ini, indikator curah hujan yang dipilih yaitu curah hujan harian maksimum satu periode tanam komoditas tertentu. Curah hujan harian maksimum diperoleh dengan mengambil nilai maksimum dalam

suatu periode. Curah hujan harian maksimum dapat mewakili curah hujan harian yang berkategori ekstrim. Jika curah hujan harian maksimum tersebut termasuk curah hujan penyebab kerugian untuk kasus kekeringan, maka curah hujan harian lain yang lebih rendah atau sama dengan curah hujan harian maksimum juga akan menyebabkan kerugian. Di sisi lain, jika curah hujan harian maksimum tersebut termasuk curah hujan penyebab kebanjiran, maka curah hujan harian maksimum ini telah mewakili kategori ekstrim (Muna, 2019b). Setelah data curah hujan harian maksimum selesai dipersiapkan, dua model distribusi dipilih untuk dianalisis. Dua model distribusi dan pendugaan parameternya adalah sebagai berikut

Model Burr Tipe XII

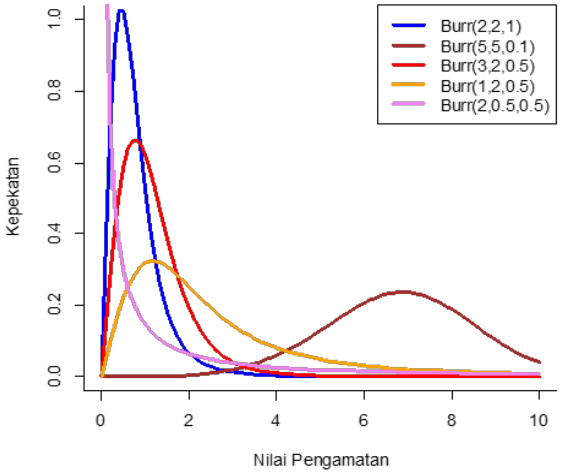
Model distribusi Burr tipe XII (α,ξ,λ) adalah distribusi kontinu untuk peubah acak tak negatif pada teori peluang, statistika, dan ekonometrika. Distribusi Burr tipe XII adalah anggota sistem distribusi kontinu yang diperkenalkan oleh Irving Wingate Burr tahun 1942. Distribusi Burr tipe XII diterapkan untuk memodelkan data dari berbagai saintifik karena distribusi Burr tipe XII mencakup berbagai nilai kemiringan dan kurtosis (Usta, 2013). λ menyatakan parameter skala dan α dan ξ menyatakan parameter bentuk. Fungsi kepekatan peluang distribusi Burr tipe XII dari peubah acak curah hujan (R) dengan parameter $\alpha>0,\xi>0$ dan $\lambda>0$ adalah

$$f_R(r)=\frac{\alpha\xi}{r}\left(\frac{r}{\lambda}\right)^{\xi}\left[1+\left(\frac{r}{\lambda}\right)^{\xi}\right]^{-\alpha-1}, \qquad (1)$$

untuk $r\geq 0$. Fungsi distribusi kumulatif dari distribusi Burr tipe XII adalah

$$F_R(r)=1-\left[1+\left(\frac{r}{\lambda}\right)^{\xi}\right]^{-\alpha}. \qquad (2)$$

Beberapa kurva kepekatan peluang distribusi Burr tipe XII dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva Kepekatan Peluang Distribusi Burr Tipe XII (α,ξ,λ) dengan Parameter $\alpha,\xi,$ dan λ yang Berbeda

Metode pendugaan kemungkinan maksimum digunakan untuk mengestimasi nilai dugaan parameter pada distribusi Burr tipe XII ini. Misalkan diberikan data *n* titik amatan curah hujan yaitu $(r_1,r_2,\ldots,r_n)$ saling bebas, identik dan berdistribusi Burr tipe XII dengan nilai parameter tidak diketahui. Fungsi *likelihood* dari *n* titik amatan yaitu

$$L(r;\alpha,\xi,\lambda)=f(r_1;\alpha,\xi,\lambda)f(r_2;\alpha,\xi,\lambda)\times\ldots\times f(r_n;\alpha,\xi,\lambda)$$

$$=\left(\frac{\alpha\xi}{r_1}\left(\frac{r_1}{\lambda}\right)^{\xi}\left[1+\left(\frac{r_1}{\lambda}\right)^{\xi}\right]^{-\alpha-1}\right)\times\ldots\times\left(\frac{\alpha\xi}{r_n}\left(\frac{r_n}{\lambda}\right)^{\xi}\left[1+\left(\frac{r_n}{\lambda}\right)^{\xi}\right]^{-\alpha-1}\right)$$

$$=\left(\frac{\alpha\xi}{\lambda^{\xi}}\right)^{n}\prod_{i=1}^{n}(r_i)^{\xi-1}\prod_{i=1}^{n}\left[1+\left(\frac{r_n}{\lambda}\right)^{\xi}\right]^{-\alpha-1} \qquad (3)$$

dengan *f* adalah fungsi kepekatan peluang distribusi Burr tipe XII pada persamaan (1). Logaritma natural dari fungsi likelihood $L(r;\alpha,\xi,\lambda)$ yaitu

$$\ln L(r;\alpha,\xi,\lambda)=n\ln\left(\frac{\alpha\xi}{\lambda^{\xi}}\right)+\sum_{i=1}^{n}\ln\left(\left(r_i\right)^{\xi-1}\right)+\sum_{i=1}^{n}\ln\left(\left[1+\left(\frac{r_i}{\lambda}\right)^{\xi}\right]^{-\alpha-1}\right). \quad (4)$$

Untuk memperoleh nilai penduga bagi α , logaritma natural dari fungsi likelihood pada persamaan (4) diturunkan terhadap α dan dibuat sama dengan nol.

$$\left.\frac{\partial \ln L(r;\alpha,\xi,\lambda)}{\partial\alpha}\right|_{(\alpha,\xi,\lambda)=(\hat{\alpha},\hat{\xi},\hat{\lambda})}=0$$

$$\leftrightarrow n\frac{1}{\hat{\alpha}}-\sum_{i=1}^{n}\ln\left(1+\left(\frac{r_i}{\hat{\lambda}}\right)^{\hat{\xi}}\right)=0$$

$$\leftrightarrow\hat{\alpha}=\left(n\sum_{i=1}^{n}\ln\left(1+\left(\frac{r_i}{\hat{\lambda}}\right)^{\hat{\xi}}\right)\right)^{-1} \quad (5)$$

Untuk memperoleh nilai penduga bagi ξ logaritma natural dari fungsi likelihood pada persamaan (4) diturunkan terhadap ξ dan dibuat sama dengan nol.

$$\left.\frac{\partial \ln L(r;\alpha,\xi,\lambda)}{\partial\xi}\right|_{(\alpha,\xi,\lambda)=(\hat{\alpha},\hat{\xi},\hat{\lambda})}=0$$

$$\leftrightarrow n\frac{\hat{\lambda}^{\hat{\xi}}}{\hat{\alpha}\hat{\xi}}\left(\frac{\hat{\alpha}-\hat{\alpha}\hat{\xi}\ln(\hat{\lambda})}{\hat{\lambda}^{\hat{\xi}}}\right)$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\ln(r_i)-(\hat{\alpha}+1)\sum_{i=1}^{n}\left(\left(\frac{r_i}{\hat{\lambda}}\right)^{\hat{\xi}}\left(\ln\left(\frac{r_i}{\hat{\lambda}}\right)\right)\left[1+\left(\frac{r_i}{\hat{\lambda}}\right)^{\hat{\xi}}\right]^{-1}\right)=0 \quad (6)$$

Untuk memperoleh nilai penduga bagi λ, logaritma natural dari fungsi likelihood pada persamaan (4) diturunkan terhadap λ dan dibuat sama dengan nol.

$$\left.\frac{\partial \ln L\left(r\,;\,\alpha,\xi,\,\lambda\right)}{\partial \lambda}\right|_{(\alpha,\xi,\,\lambda)=\left(\hat{\alpha},\hat{\xi},\hat{\lambda}\right)}=0$$

$$\leftrightarrow -n\frac{1}{\hat{\alpha}\hat{\xi}\hat{\lambda}}-\left(\hat{\alpha}+1\right)\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{-\hat{\xi}}{\hat{\lambda}}\left(\frac{r_i}{\hat{\lambda}}\right)^{\hat{\xi}}\left[1+\left(\frac{r_i}{\hat{\lambda}}\right)^{\hat{\xi}}\right]^{-1}\right)=0 \qquad (7)$$

Perhatikan bahwa persamaan (5), (6), dan (7) adalah persamaan implisit sehingga penduga bagi $\mu, \sigma,$ dan ξ tidak dapat ditentukan secara analitik dan dapat diselesaikan dengan bantuan perangkat lunak R.

Model Mixture Gamma-2 Komponen

Distribusi Mixture Gamma-2 komponen $\left(p_1, \alpha_1,\alpha_2, \lambda_1, \lambda_2\right)$ umum digunakan untuk memodelkan distribusi dari dua populasi (Lakshmi & Vaidyanathan, 2015). α_i melambangkan parameter bentuk dari komponen ke-*i* dan $1/\lambda_i$ menotasikan parameter skala dari komponen ke-*i* dengan *i* = 1, 2. Fungsi kepekatan peluang (f_R) dari model distribusi Mixture Gamma-2 komponen adalah sebagai berikut

$$f_R\left(r\right)=p_1\frac{\lambda_1^{\alpha_1}}{\Gamma\left(\alpha_1\right)}r^{\alpha_1-1}\exp\left(-\lambda_1 r\right)+p_2\frac{\lambda_2^{\alpha_2}}{\Gamma\left(\alpha_2\right)}r^{\alpha_2-1}\exp\left(-\lambda_2 r\right), \qquad (8)$$

dan fungsi distribusi kumulatif dari distribusi Mixture Gamma-2 komponen adalah

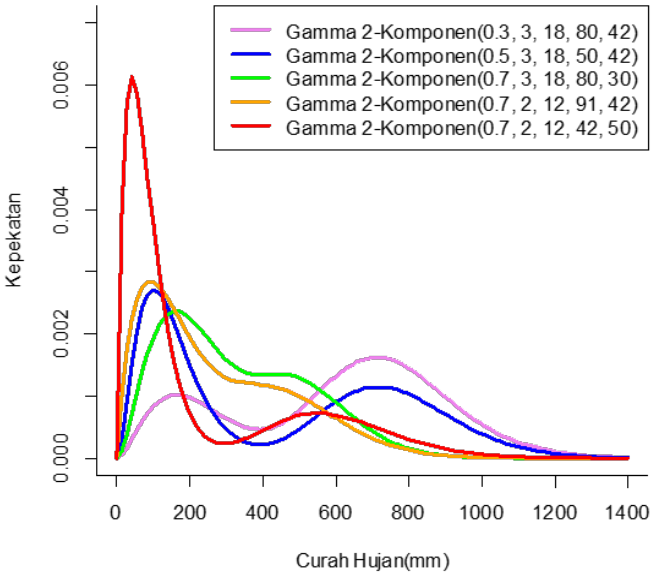
$$F_R\left(r\right)=p_1\frac{1}{\Gamma\left(\alpha_1\right)}\gamma\left(\alpha_1,\lambda_1 r\right)+p_2\frac{1}{\Gamma\left(\alpha_2\right)}\gamma\left(\alpha_2,\lambda_2 r\right), \qquad (9)$$

dengan p_1 dan p_2 adalah proporsi,

$p_1+p_2=1,\ p_1>0, p_2>0, \alpha_1>0,\quad \alpha_2>0,\ \lambda_1>0,\ \lambda_2>0,\ r\geq 0,$

$\Gamma\left(\alpha\right)=\int_0^\infty \exp\left(-r\right)r^{\alpha-1}dr$, dan $\gamma\left(\alpha,\lambda r\right)=\int_0^{\lambda r}\left(u\right)^{\alpha-1}\exp\left(-u\right)du$.

Beberapa kurva kepekatan peluang distribusi Mixture Gamma-2 komponen dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Kurva Kkepekatan Peluang Distribusi *Mixture Gamma*-2 Komponen $(p_1,\alpha_1,\alpha_2,\lambda_1,\lambda_2)$ dengan Parameter $p_1,\alpha_1,\alpha_2,\lambda_1$ dan λ_2 yang Berbeda

Metode pendugaan kemungkinan maksimum digunakan untuk mengestimasi nilai dugaan parameter pada distribusi Mixture Gamma-2 komponen. Misalkan diberikan data *n* titik amatan curah hujan yaitu $(r_1,r_2,\ldots,r_n)$ saling bebas, identik dan berdistribusi Mixture Gamma-2 komponen dengan nilai parameter tidak diketahui. Fungsi likelihood dari *n* titik amatan yaitu

$$L(r;\theta)=\prod_{l=1}^{n}\left(p_1\frac{\lambda_1^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1)}r_l^{\alpha_1-1}\exp(-\lambda_1 r_l)+p_2\frac{\lambda_2^{\alpha_2}}{\Gamma(\alpha_2)}r_l^{\alpha_2-1}\exp(-\lambda_2 r_l)\right). \quad (10)$$

Logaritma natural dari fungsi *likelihood* $L(r;\theta)$ pada persamaan (10) yaitu

$$\ln L(r;\theta)=\sum_{i=1}^{n}\ln\left(p_1\frac{\lambda_1^{\alpha_1}}{\Gamma(\alpha_1)}r_i^{\alpha_1-1}\exp(-\lambda_1 r_i)+p_2\frac{\lambda_2^{\alpha_2}}{\Gamma(\alpha_2)}r_i^{\alpha_2-1}\exp(-\lambda_2 r_i)\right). \quad (11)$$

Untuk memperoleh nilai penduga bagi p_1, logaritma natural dari fungsi likelihood pada persamaan (11) diturunkan terhadap p_1 dan dibuat sama dengan nol.

$$\left.\frac{\partial \ln L(r;\theta)}{\partial p_1}\right|_{(p_1,\alpha_1,\alpha_2,\lambda_1,\lambda_2)=(\widehat{p}_1,\widehat{\alpha}_1,\widehat{\alpha}_2,\widehat{\lambda}_1,\widehat{\lambda}_2)}=0$$

$$\leftrightarrow\sum_{i=1}^{n}\frac{\frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\Gamma(\widehat{\alpha}_1)}r_i^{\widehat{\alpha}_1-1}\exp(-\widehat{\lambda}_1 r_i)}{\ln\left(\widehat{p}_1\frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\Gamma(\widehat{\alpha}_1)}r_i^{\widehat{\alpha}_1-1}\exp(-\widehat{\lambda}_1 r_i)+(1-\widehat{p}_1)\frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2}}{\Gamma(\widehat{\alpha}_2)}r_i^{\widehat{\alpha}_2-1}\exp(-\widehat{\lambda}_2 r_i)\right)}=0 \quad (12)$$

Untuk memperoleh nilai penduga bagi α_1, logaritma natural dari fungsi likelihood pada persamaan (11) diturunkan terhadap α_1, dan dibuat sama dengan nol.

$$\left.\frac{\partial \ln L(r;\theta)}{\partial \alpha_1}\right|_{(p_1,\alpha_1,\alpha_2,\lambda_1,\lambda_2)=(\widehat{p}_1,\widehat{\alpha}_1,\widehat{\alpha}_2,\widehat{\lambda}_1,\widehat{\lambda}_2)}=0$$

$$\leftrightarrow\sum_{i=1}^{n}\frac{\widehat{p}_1\frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\Gamma(\widehat{\alpha}_1)}r_i^{\widehat{\alpha}_1-1}\exp(-\widehat{\lambda}_1 r_i)\ln\widehat{\lambda}_1+\widehat{p}_1\frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\Gamma(\widehat{\alpha}_1)}r_i^{\widehat{\alpha}_1-1}\exp(-\widehat{\lambda}_1 r_i)\ln r_i-\widehat{p}_1\frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\left(\Gamma(\widehat{\alpha}_1)\right)^2}\exp(-\widehat{\lambda}_1 r_i)r_i^{\widehat{\alpha}_1-1}}{\ln\left(\widehat{p}_1\frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\Gamma(\widehat{\alpha}_1)}r_i^{\widehat{\alpha}_1-1}\exp(-\widehat{\lambda}_1 r_i)+(1-\widehat{p}_1)\frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2}}{\Gamma(\widehat{\alpha}_2)}r_i^{\widehat{\alpha}_2-1}\exp(-\widehat{\lambda}_2 r_i)\right)}=0$$

$$\leftrightarrow \sum_{i=1}^{n} \frac{\widehat{p}_1 \frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_1\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_1-1} \exp\left(-\widehat{\lambda}_1 r_i\right)\left(\ln \widehat{\lambda}_1 + \ln r_i - \frac{1}{\left(\Gamma\left(\widehat{\alpha}_1\right)\right)^2}\right)}{\ln\left(\widehat{p}_1 \frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_1\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_1-1} \exp\left(-\widehat{\lambda}_1 r_i\right) + \left(1-\widehat{p}_1\right) \frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_2-1} \exp\left(-\widehat{\lambda}_2 r_i\right)\right)} = 0 \quad (13)$$

Untuk memperoleh nilai penduga bagi α_2, logaritma natural dari fungsi likelihood pada persamaan (11) diturunkan terhadap α_2 dan dibuat sama dengan nol.

$$\frac{\partial \ln L(r;\theta)}{\partial \alpha_2}\Big|_{(p_1,\alpha_1,\alpha_2,\lambda_1,\lambda_2)=(\widehat{p}_1,\widehat{\alpha}_1,\widehat{\alpha}_2,\widehat{\lambda}_1,\widehat{\lambda}_2)} = 0$$

$$\leftrightarrow \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(1-\widehat{p}_1\right) \frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_2-1} \exp\left(-\widehat{\lambda}_2 r_i\right) \ln \widehat{\lambda}_2 + \left(1-\widehat{p}_1\right) \frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_2-1} \exp\left(-\widehat{\lambda}_2 r_i\right) \ln r_i - \left(1-\widehat{p}_1\right) \frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2}}{\left(\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)\right)^2} r_i^{\widehat{\alpha}_2-1} \exp\left(-\widehat{\lambda}_2 r_i\right)}{\ln\left(\widehat{p}_1 \frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_1\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_1-1} \exp\left(-\widehat{\lambda}_1 r_i\right) + \left(1-\widehat{p}_1\right) \frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_2-1} \exp\left(-\widehat{\lambda}_2 r_i\right)\right)}$$

$$\leftrightarrow \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(1-\widehat{p}_1\right) \frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_2-1} \exp\left(-\widehat{\lambda}_2 r_i\right)\left(\ln \widehat{\lambda}_2 + \ln r_i - \left(\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)\right)^2\right)}{\ln\left(\widehat{p}_1 \frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_1\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_1-1} \exp\left(-\widehat{\lambda}_1 r_i\right) + \left(1-\widehat{p}_1\right) \frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_2-1} \exp\left(-\widehat{\lambda}_2 r_i\right)\right)} = 0 \quad (14)$$

Untuk memperoleh nilai penduga bagi λ_1, logaritma natural dari fungsi likelihood pada persamaan (11) diturunkan terhadap λ_1 dan dibuat sama dengan nol.

$$\frac{\partial \ln L(r;\theta)}{\partial \lambda_1}\Big|_{(p_1,\alpha_1,\alpha_2,\lambda_1,\lambda_2)=(\widehat{p}_1,\widehat{\alpha}_1,\widehat{\alpha}_2,\widehat{\lambda}_1,\widehat{\lambda}_2)} = 0$$

$$\leftrightarrow \sum_{i=1}^{n} \frac{\widehat{p}_1 \widehat{\alpha}_1 \frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1-1}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_1\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_1-1} \exp\left(-\widehat{\lambda}_1 r_i\right) - \widehat{p}_1 \frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_1\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_1-1} r_i \exp\left(-\widehat{\lambda}_1 r_i\right)}{\ln\left(\widehat{p}_1 \frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_1\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_1-1} \exp\left(-\widehat{\lambda}_1 r_i\right) + \left(1-\widehat{p}_1\right) \frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_2-1} \exp\left(-\widehat{\lambda}_2 r_i\right)\right)}$$

$$\leftrightarrow \sum_{i=1}^{n} \frac{\widehat{p}_1 \frac{1}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_1\right)} \exp\left(-\widehat{\lambda}_1 r_i\right)\left(\widehat{\alpha}_1 r_i^{\widehat{\alpha}_1-1}\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1-1} - \widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1} r_i^{\widehat{\alpha}_1}\right)}{\ln\left(\widehat{p}_1 \frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_1\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_1-1}\exp\left(-\widehat{\lambda}_1 r_i\right) + \left(1-\widehat{p}_1\right)\frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_2-1}\exp\left(-\widehat{\lambda}_2 r_i\right)\right)} = 0 \quad (15)$$

Untuk memperoleh nilai penduga bagi λ_2, logaritma natural dari fungsi *likelihood* pada persamaan (11) diturunkan terhadap λ_2 dan dibuat sama dengan nol.

$$\frac{\partial \ln L\left(r;\theta\right)}{\partial \lambda_2}\Big|_{(p_1,\alpha_1,\alpha_2,\lambda_1,\lambda_2)=\left(\widehat{p}_1,\widehat{\alpha}_1,\widehat{\alpha}_2,\widehat{\lambda}_1,\widehat{\lambda}_2\right)} = 0$$

$$\leftrightarrow \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(1-\widehat{p}_1\right)\widehat{\alpha}_2 \frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2-1}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_2-1}\exp\left(-\widehat{\lambda}_2 r_i\right) - \left(1-\widehat{p}_1\right)\frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_2-1} r_i \exp\left(-\widehat{\lambda}_2 r_i\right)}{\ln\left(\widehat{p}_1 \frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_1\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_1-1}\exp\left(-\widehat{\lambda}_1 r_i\right) + \left(1-\widehat{p}_1\right)\frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_2-1}\exp\left(-\widehat{\lambda}_2 r_i\right)\right)} = 0$$

$$\leftrightarrow \sum_{i=1}^{n} \frac{\left(1-\widehat{p}_1\right)\frac{1}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)} \exp\left(-\widehat{\lambda}_2 r_i\right)\left(\widehat{\alpha}_2 r_i^{\widehat{\alpha}_2-1}\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2-1} - \widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2} r_i^{\widehat{\alpha}_2}\right)}{\ln\left(\widehat{p}_1 \frac{\widehat{\lambda}_1^{\widehat{\alpha}_1}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_1\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_1-1}\exp\left(-\widehat{\lambda}_1 r_i\right) + \left(1-\widehat{p}_1\right)\frac{\widehat{\lambda}_2^{\widehat{\alpha}_2}}{\Gamma\left(\widehat{\alpha}_2\right)} r_i^{\widehat{\alpha}_2-1}\exp\left(-\widehat{\lambda}_2 r_i\right)\right)} = 0 \quad (16)$$

Perhatikan bahwa persamaan (12), (13), (14), (15) dan (16) adalah persamaan implisit sehingga penduga bagi $p_1, \alpha_1, \alpha_2, \lambda_1,$ dan λ_2 tidak dapat ditentukan secara analitik. Oleh karena itu, persamaan tersebut dapat diselesaikan dengan fungsi gammamixEM() pada *mixtools package* di R.

6. Model Asuransi Pertanian Indeks Curah Hujan untuk Komoditas Pertanian

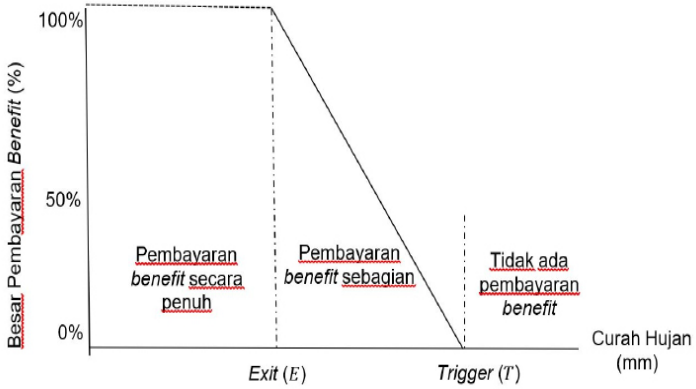
Asuransi pertanian indeks curah hujan merupakan salah satu alternatif model penjamin kerugian di bidang pertanian

dengan pertimbangan curah hujan. Asuransi pertanian indeks curah hujan memiliki beberapa asumsi, diantaranya adalah sebagai berikut.

a. objek yang diasuransikan adalah lahan pertanian tadah hujan;
b. curah hujan kumulatif selama kurun waktu tertentu adalah indikator curah hujan yang digunakan, misal kurun waktu satu masa tanam padi (tiga bulan);
c. informasi curah hujan harian ekstrim tidak diperhatikan;
d. peluang klaim *benefit* adalah peluang curah hujan tertentu masa lalu;
e. model klaim *benefit* menjamin kerugian akibat curah hujan tertentu hingga perlindungan dari salah satu bencana, yaitu kekeringan atau banjir saja;
f. indeks curah hujan disusun dari data curah hujan pada periode waktu yang diperkirakan berisiko kerugian, baik melalui analisis korelasi maupun tidak;
g. faktor-faktor lain penyebab kerugian diabaikan (misal faktor penyakit tanaman atau serangan organisme pembasmi tanaman).

(Muna 2017; Muna 2019a)

Muna (2017) mengembangkanproduk asuransi pertanian berdasarkan pertimbangan curah hujan menggunakan model klaim *benefit* untuk kasus kekeringan yang berlandaskan literatur dari jurnal Boer (2012) yang berjudul *"Asuransi Iklim Sebagai Jaminan Perlindungan Ketahanan Petani Terhadap Perubahan Iklim 1"*. Model klaim *benefit* tersebut diilustrasikan dengan Gambar 3. sebagai berikut.



Sumber: Muna, 2017

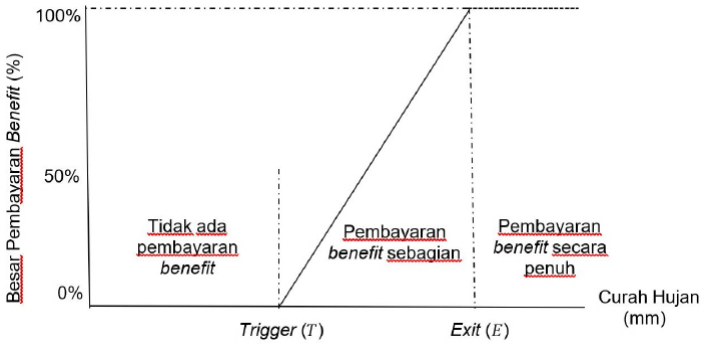
Gambar 3. Model Klaim Benefit untuk Kasus Kekeringan

Model klaim *benefit* untuk kasus kekeringan pada Gambar 3. terbagi menjadi tiga kondisi pembayaran, yaitu pembayaran *benefit* penuh, pembayaran *benefit* sebagaian, dan tidak ada pembayaran *benefit*. Setiap kondisi dipartisi oleh parameter indeks, yaitu *exit* (E) dan *trigger* (T). *Exit* didefinisikan sebagai patokan kapan pemegang polis dapat mengajukan klaim untuk pembayaran *benefit* penuh. Patokan kapan pemegang polis mulai melakukan klaim untuk pembayaran *benefit* sebagian didefinsikan dengan *trigger.*

a. Produk Asuransi Pertanian Indeks Curah Hujan untuk Kasus Kebanjiran

Asuransi pertanian indeks curah hujan untuk kasus kebanjiran menjamin suatu komoditas pertanian di lahan tadah hujan (kebutuhan air suatu komoditas pertanian hanya dipenuhi dari curah hujan saja) dari curah hujan tinggi yang berpotensi menurunkan produktivitas pertanian hingga curah hujan tinggi yang merendam/merusak dan berdampak puso bagi suatu komoditas pertanian. Penggantian kerugian pada asuransi pertanian indeks curah hujan ini berdasarkan realisasi curah hujan dengan indikator harian maksimum (R) yang

diukur selama periode asuransi di stasiun iklim tertentu. Model klaim *benefit (X)* pada asuransi pertanian indeks curah hujan untuk kasus kebanjiran dikembangkan dari model klaim *benefit* bagi kasus kekeringan. Adapun model klaim *benefit* tersebut diilustrasikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Model Klaim *Benefit* untuk Kasus Kebanjiran

Parameter indeks curah hujan yang digunakan pada asuransi pertanian indeks curah hujan bagi kasus kebanjiran adalah *exit* (E) dan *trigger (T). Exit* adalah patokan kapan pemegang polis dapat mengajukan klaim untuk pembayaran *benefit* penuh. Patokan kapan pemegang polis dapat melakukan klaim untuk pembayaran *benefit* sebagian disebut *trigger.* Nilai *trigger* dan *exit* bergantung pada ketersediaan literatur tentang karaktertistik curah hujan harian maksimum ideal dan berisiko bagi suatu komoditas pertanian. Jika informasi tentang karakteristik tersebut tidak tersedia, maka nilai parameter *trigger* dan *exit* dapat dipandang sebagai kuantil dari peluang kesediaan perusahaan asuransi untuk menjamin kerugian pada risiko-risiko tertentu (Muna, 2019b).

Model klaim *benefit* untuk kasus kebanjiran terbagi menjadi 3 kondisi, yaitu sebagai berikut

- Kondisi I $\left(R \leq T\right)$

Kondisi I adalah kondisi saat realisasi curah hujan harian maksimum bernilai lebih rendah atau sama dengan *trigger.*

Curah hujan pada kondisi I adalah curah hujan harian maksimum ideal selama kurun waktu tertentu di suatu wilayah bagi suatu komoditas. Jika kondisi I terpenuhi, maka pemegang polis tidak dapat melakukan klaim *benefit* asuransi $(X=0)$. Peluang kondisi 1 terpenuhi dinotasikan dengan M_1 dan diformulasikan dengan persamaan berikut ini

$$M_1 = P(R \leq T) = F_R(T), \tag{17}$$

dimana F_R menyatakan fungsi distribusi kumulatif dari distribusi terpilih yang memodelkan data curah hujan harian maksimum.

- Kondisi II $(T < R < E)$

Kondisi II adalah kondisi ketika realisasi curah hujan harian maksimum berada diantara *trigger* dan *exit.* Curah hujan pada kondisi ini mengakibatkan penurunan produktivitas pertanian. Jika kondisi II terpenuhi maka pemegang polis dapat melakukan klaim *benefit* asuransi sebesar

$$X = \frac{b(E-R)}{E-T}, \tag{18}$$

- Kondisi III $(R \geq E)$

Kondisi III adalah kondisi ketika realisasi curah hujan harian maksimum bernilai lebih dari atau sama dengan *exit*. Curah hujan pada kondisi III dapat mengakibatkan puso (tidak ada hasil panen) karena curah hujan ini merendam dan merusak suatu komoditas pertanian. Jika kondisi III terpenuhi, maka pemegang polis dapat melakukan klaim *benefit* penuh sebesar *b*. Peluang kondisi III terpenuhi dinotasikan dengan M_2 dan diformulasikan dengan persamaan berikut

$$M_2 = P(R \geq E) = 1 - F_R(E) \tag{19}$$

dimana F_R menyatakan fungsi distribusi kumulatif dari distribusi terpilih yang memodelkan data curah hujan harian maksimum.

Premi tunggal bersih (P) dibayarkan sekali oleh pemegang polis di awal penandatangan polis asuransi untuk mendapatkan perlindungan dari curah hujan harian maksimum tertentu yang berpotensi banjir. Pada ilmu aktuaria, premi tunggal bersih adalah nilai harapan dari besaran klaim *benefit* dengan suku bunga diasumsikan 0. Nilai harapan besaran klaim *benefit* pada produk asuransi ini merupakan perkalian besaran klaim *benefit* dengan peluangnya untuk beberapa kemungkinan besaran klaim *benefit.* Oleh karena itu, formula premi tunggal bersih pada model asuransi pertanian indeks curah hujan untuk menjamin suatu komoditas pertanian dari kasus kebanjiran dapat dilihat pada persamaan (20).

$$P = \mathbb{E}\left[X\right] = 0M_1 + \mathbb{E}\left[\left(\frac{b\left(E-R\right)}{E-T}\right) | T<R<E\right] + bM_2. \qquad (20)$$

STUDI KASUS

1. Pemodelan Curah Hujan Harian Maksimum dan Pendugaan Parameternya

a. Data Curah Hujan Harian Maksimum

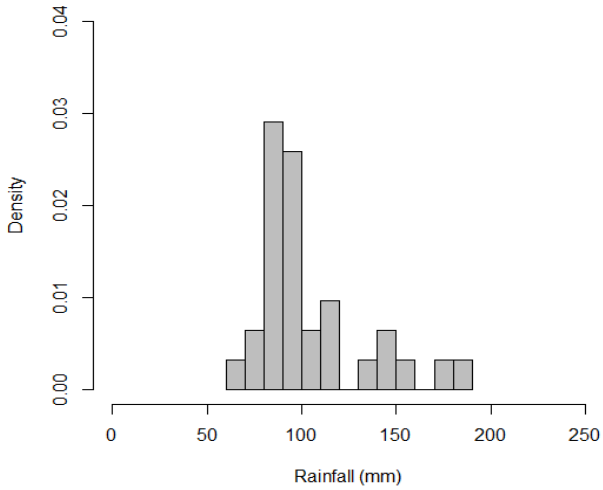
Data sekunder yang digunakan pada studi kasus ini adalah data curah hujan harian maksimum satu periode masa tanam padi (bulan September sampai dengan bulan Desember) di Dramaga Bogor (Muna, 2019b). Data tersedia sejak 1 Januari 1984 sampai dengan 31 Desember 2014. Sumber utama data curah hujan harian ini diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG).

b. Eksplorasi Data Curah Hujan Harian Maksimum

Histogram pada Gambar 5. mengilustrasikan data 31 amatan curah hujan harian maksimum periode satu masa tanam padi (bulan September sampai dengan bulan Desember tahun 1984 sampai dengan tahun 2014). Curah hujan harian maksimum ini berada pada rentang 63 mm sampai dengan 188.3 mm dengan rata-rata 104.42 mm. Rata-rata kategori curah hujan harian maksimum di Dramaga Bogor adalah curah hujan sangat lebat. Hal ini menandakan bahwa Dramaga Bogor untuk

periode bulan September sampai dengan bulan Desember di masa lalu berpotensi banjir dan kecil kemungkinan untuk terjadinya kekeringan.

Data curah hujan harian maksimum ini memiliki sebaran data yang tidak simetris. Distribusi data tersebut akan dimodelkan oleh distribusi Burr tipe XII dan Mixture Gamma-2 komponen. Selanjutnya, kedua model akan dikalibrasi pada tahap pendugaan parameter dan dipilih satu distribusi yang paling representatif memodelkan data curah hujan harian maksimum pada tahap pengujian kesesuaian secara matematis.



Gambar 5. Histogram Curah Hujan Harian Maksimum Periode Bulan September Sampai dengan Bulan Desember Tahun 1984 sampai dengan Tahun 2014

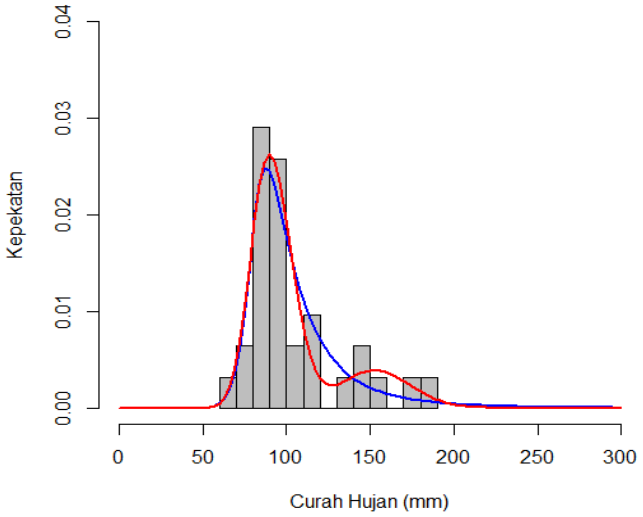
c. Nilai Penduga Parameter

Nilai penduga parameter model distribusi Burr tipe XII dan Mixture Gamma-2 komponen diperoleh dengan metode penduga kemungkinan maksimum. Nilai penduga parameter untuk masing-masing model dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Dugaan Parameter dari Distribusi Burr tipe XII dan Mixture Gamma-2 Komponen

Penduga Parameter	
Model Burr Burr tipe XII	**Model Gamma 2 Komponen**
$\alpha = 0,2877296$	$p_1 = 0,7991189$
$\xi = 15,240452$	$\alpha_1 = 56,104382$
$\lambda = 0,01210823$	$\alpha_2 = 56,310756$
	$\lambda_1 = 1,634635$
	$\lambda_2 = 2,752178$

Selanjutnya, ilustrasi fungsi kepekatan peluang dari kedua model distribusi dengan masing-masing nilai dugaan parameternya diberikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Fungsi Kepekatan Peluang Burr tipe XII (Biru) dan Mixture Gamma-2 Komponen (Merah) terhadap Histogram Data Empirik

d. Uji Kesesuaian Data Curah Hujan Harian Maksimum

Analisis model dilakukan untuk memvalidasi kedua model dan menyeleksi model yang paling baik dalam merepresentasikan data curah hujan harian maksimum. Analisis model dilakukan melalui tahap pengujian kesesuaian secara matematis. Pengujian model dengan uji Kolmogorov-Smirnov untuk model Burr tipe XII dan Mixture Gamma-2 komponen adalah sebagai berikut

1) Hipotesis 1 (Model Distribusi Burr tipe XII)
   H_0 : data curah hujan harian maksimum di Dramaga Bogor berdistribusi Burr tipe XII,
   H_1 : data curah hujan harian maksimum di Dramaga Bogor tidak berdistribusi Burr tipe XII.
2) Hipotesis 2 (Model Distribusi Mixture Gamma-2 komponen)
   H_0 : data curah hujan harian maksimum di Dramaga Bogor berdistribusi Mixture Gamma-2 komponen,
   H_1 : data curah hujan harian maksimum di Dramaga Bogor tidak berdistribusi Mixture Gamma-2 komponen.

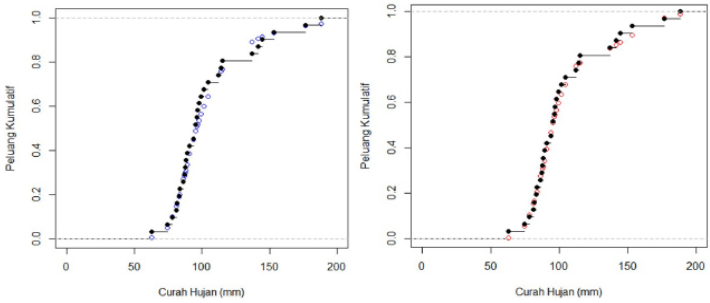
Nilai statistik dan keputusan uji Kolmogorov-Smirnov (KS) dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Statistik dan Keputusan uji Kolmogorov-Smirnov (KS) dari Distribusi Burr Tipe XII dan Mixture Gamma-2 Komponen

Nilai Statistik Kolmogorov-Smirnov	
Model Burr Tipe XII	**Model Mixture Gamma-2 komponen**
0,0707657 (< 0,2442634) (Tidak tolak H_0)	0,0707657 (< 0,2442634) (Tidak tolak H_0)

Berdasarkan Tabel 2, nilai statistik KS model distribusi Burr tipe XII yaitu 0,07979657 dan nilai statistik KS model distribusi Mixture Gamma-2 komponen yaitu 0,04935333. Nilai kritis untuk 31 amatan pada taraf nyata 5% adalah 0,2442632. Nilai statistik KS untuk kedua model lebih kecil daripada nilai kritis. Hal ini memberikan keputusan untuk tidak menolak hipotesis nol (H_0) bagi kedua model.

Tabel 2 menginformasikan lebih lanjut bahwa model distribusi Mixture Gamma-2 komponen memiliki nilai statistik lebih kecil dibandingkan model distribusi Burr tipe XII. Analisis secara matematis menyimpulkan distribusi Mixture Gamma 2 Komponen lebih representatif memodelkan distribusi data sebenarnya dibandingkan distribusi Burr tipe XII. Ilustrasi kedekatan kedua model distribusi dengan distribusi kumulatif empirik diberikan pada Gambar 7.



a b

Gambar 7. Kurva Distribusi Kumulatif Empirik (Hitam) dan Distribusi Kumulatif a) Burr Tipe XII (Biru) dan b) Mixture Gamma-2 Komponen (Merah)

2. Ilustrasi Penentuan Premi Tunggal Bersih dari Produk Asuransi Pertanian Indeks Curah Hujan Kasus Kebanjiran

Asumsi-asumsi yang berlaku pada asuransi pertanian indeks curah hujan untuk menjamin padi dari kasus kebanjiran dimuat pada polis asuransi yang diberikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Polis Asuransi Pertanian Indeks Curah Hujan untuk Kasus Kebanjiran

No.	Kriteria	Keterangan
1.	Komoditas Pertanian	Padi
2.	Lahan Pertanian	Lahan tadah hujan di mana kebutuhan air bagi padi hanya dipenuhi dari curah hujan saja
3.	Periode Asuransi	Satu masa tanam padi (bulan September sampai dengan bulan Desember)
4.	Pemegang Polis	Petani padi yang memiliki lahan sawah tadah hujan minimal satu hektar
5.	Ganti Rugi	Berdasarkan realisasi curah hujan harian maksimum yang diukur selama periode asuransi di stasiun curah hujan di wilayah yang diasuransikan (oleh lembaga curah hujan berwenang)
6.	Benefit	*Benefit* penuh: Rp6.000.000,00/hektar (sebesar biaya produksi padi) *Benefit* sebagian: $0 \leq b <$ Rp6.000 000,00/hektar
7.	Sistem Pembayaran	Premi tunggal bersih dibayarkan sekali di awal periode asuransi dan klaim *benefit* dapat dilakukan di akhir periode asuransi.

Berdasarkan uji kesesuaian model secara matematis, model distribusi Mixture Gamma-2 komponen terpilih untuk merepresentasikan distribusi data curah hujan harian masa lalu. Peluang curah hujan harian maksimum masa lalu merupakan peluang klaim *benefit.* Oleh karena itu, rumusan premi tunggal bersih bagi produk asuransi pertanian indeks curah hujan yang menjamin komoditas padi dari kasus kebanjiran secara eksplisit diberikan pada persamaan (21).

$$P = \int_{E}^{T} \left(\frac{6.000.000 \times (E - r)}{E - T} \right) \cdot$$
$$\times \left(0,7991189 \frac{1,634635^{56,104382}}{\Gamma(56,104382)} r^{56,104382-1} \exp(-1,634635r) \right.$$
$$\left. + 0,2008811 \frac{2,752178^{56,310756}}{\Gamma(56,310756)} r^{56,310756-1} \exp(-2,752178r) \right) dr$$
$$+ 6.000.000 - 6.000.000 \left(\frac{0,7991189}{\Gamma(56,104382)} \int_{0}^{1,634635E} (u)^{56,104382-1} \exp(-u) du \right.$$
$$\left. + \frac{0,2008811}{\Gamma(56,310756)} \int_{0}^{2,752178E} (u)^{56,310756-1} \exp(-u) du \right). \quad (21)$$

Parameter *trigger* dan *exit* adalah kuantil-kuantil dari peluang kesediaan perusahaan asuransi untuk menjamin komoditas padi di lahan tadah hujan. Adapun nilai *trigger* dan *exit* diperoleh dengan menyelesaikan persamaan (17) dan (19). Diberikan 6 contoh kasus besaran premi tunggal bersih yang diilustrasikan pada Tabel 4. di bawah ini.

Tabel 4. Contoh Kasus Premi Tunggal Bersih

Contoh Kasus	M1	M2	T (milimeter)	E (milimeter)	Premi Tunggal Bersih (Rupiah/ hektar)
1.	50%	5%	95,12857	168,4383	2.148.178,70
2.	75%	5%	111,0212	168,4383	913.707,80
3.	80%	5%	122,15752	168,4383	718.861,90
4.	90%	4%	154,1757	172,1073	432.655,70
5.	90%	1%	154,1757	190,4892	390.739.00
6.	95%	1%	168,4383	190,4892	203.020,90

Berdasarkan Tabel 4., dapat dilihat bahwa harga premi tunggal bersih bervariasi dan bergantung kepada berapa persen kesediaan perusahaan asuransi untuk menjamin kerugian. Harga premi tunggal bersih yang harus dibayarkan pemegang polis akan semakin mahal jika semakin tinggi risiko yang dijamin oleh perusahaan asuransi. Sebagai contoh kasus 1, perusahaan asuransi siap menjamin risiko kerugian dari realisasi curah hujan harian maksimum yang memenuhi kondisi II atau kondisi III hingga 50% dengan 5% untuk menjamin petani dari kasus puso (kondisi III). Diketahui data curah hujan harian maksimum di Dramaga Bogor berkategori curah hujan sangat lebat, artinya risiko yang harus ditanggung perusahaan asuransi tinggi. Hal ini berimplikasi pada harga premi yang tinggi yaitu Rp2.148.178,70/ hektar. Sebaliknya, semakin kecil risiko yang dijamin oleh perusahaan asuransi maka premi yang harus dibayar juga semakin rendah. Sebagai contoh dapat dilihat pada contoh kasus 6, dimana perusahaan asuransi siap menjamin kerugian hanya sebesar 5% dan kesediaan untuk menjamin risiko puso adalah 1%, sehingga harga premi jauh lebih murah yaitu Rp203.020,90/ hektar, sekitar 10% dari kasus 1.

KESIMPULAN

Produk asuransi pertanian indeks curah hujan yang dikembangkan dalam artikel ini adalah model alternatif penjamin kerugian bagi komoditas pertanian tertentu di lahan tadah hujan akibat ketidakpastian curah hujan tinggi yang berpotensi banjir. Indeks curah hujan yang diasuransikan berindikator curah hujan harian maksimum. Model klaim *benefit* asuransi pertanian indeks curah hujan kasus kebanjiran ini dibagi menjadi tiga kondisi pembayaran klaim *benefit*, yaitu kondisi pembayaran penuh, kondisi pembayaran sebagian, dan kondisi tidak ada pembayaran. *Trigger* dan *exit* adalah parameter indeks yang membagi tiga kondisi pembayaran tersebut dan merupakan kuantil-kuantil dari peluang kesediaan perusahaan asuransi untuk menjamin suatu kerugian bagi komoditas pertanian tertentu.

Studi kasus menunjukkan bahwa distribusi Mixture Gamma-2 komponen lebih representatif dibandingkan distribusi Burr tipe XII dalam memodelkan curah hujan harian maksimum di Dramaga Bogor (periode bulan September sampai bulan Desember mulai tahun 1984 sampai tahun 2014). Informasi yang diperoleh dari model distribusi Mixture Gamma-2 komponen terhadap peluang klaim *benefit,* berimplikasi pada rumusan premi tunggal bersih yaitu $P = 0M_1 + \mathbb{E}\left[\left(\frac{b(E-R)}{E-T}\right) | T < R < E\right] + bM_2.$

Semakin besar risiko kerugian yang dijamin perusahaan asuransi maka harga premi tunggal bersih semakin mahal. Berlaku sebaliknya, semakin kecil risiko kerugian yang dijamin perusahaan asuransi maka harga premi tunggal bersih semakin murah.

DAFTAR PUSTAKA

BMKG. (2022). Probabilistik curah hujan 20 mm (tiap 24 jam). https://www.bmkg.go.id/cuaca/probabilistik-curah-hujan.bmkg. Diakses 20 Juli 2022.

BNPB. (2013). *Indeks Risiko Bencana Indonesia (IRBI) Tahun 2013*. Bogor: Direktorat Pengurangan Risiko Bencana.

Boer, R. (2012). Asuransi iklim sebagai jaminan perlindungan ketahanan petani terhadap perubahan iklim. Prosiding Widyakarya Nasional Pangan dan Gizi 10 "Pemantapan Ketahanan Pangan dan Perbaikan Gizi Berbasis Kemandirian dan Kearifan Lokal," Jakarta: LIPI.

Hogg, R. V., Craig, A. T., & McKean, J. W. (2014). *Introduction to mathematical statistics*. New Jersey: Prentice Hall.

Klugman, S. A., Panjer, H. H., & Willmot, G. E. (2012). *Loss models from data to decisions*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Lakshmi, R. V., & Vaidyanathan, V. S. (2015). Parameter estimation in Gamma mixture model using Normal-based approximation. *Journal of Statistical Theory and Applications,* 15(1), 25-35.

Marsidah. (2020). Premi Restorno dalam perjanjian asuransi. *Solusi,* 18(3), 312-321.

McKay, C. (2019). *Probability and statistics*. Waltham Abbey: ED-Tech Press.

Muna, S. U. N. (2017). Penentuan besaran premi produk asuransi pertanian berdasarkan pertimbangan curah hujan (Undergraduate thesis). Bogor: Institut Pertanian Bogor.

Muna, S. U. N. (2019a). Premium rate determination of crop insurance product based on rainfall Index consideration. *IOP Conf. Series*: *Earth and Environmental Science*. doi:10.1088/1755-1315/299/1/012047.

Muna, S. U. N. (2019b). Model asuransi pertanian berdasarkan indeks curah hujan (Studi kasus: komoditas padi di Dramaga Bogor) (Master thesis). Bogor: Institut Pertanian Bogor.

Papalexiou, S. M., & Koutsoyiannis, D. (2013). Battle of extreme value distributions: A global survey on extreme daily rainfall. *Journal of Water Resource Research,* 64(1), 129-134.

Silviastuti, F. (2013). Penentuan periode optimal amortization gains and losses dengan meminimumkan ragam kontribusi jangka panjang (Undergraduate thesis). Bogor: Institut Pertanian Bogor.

Undang-undang Republik Indonesia. (2014). Undang-undang Republik Indonesia Nomor 40 tahun 2014 tentang perasuransian. Jakarta.

Usta, I. (2013). Different estimation methods for the parameters of the extended Burr XII distribution. *Journal of Applied Statistics*, 40(2), 397-414.

Widagdo, B., & Lestari, N. P. (2018). Manajemen risiko dan asuransi. Malang: Universitas Muhammadiyah Malang.

ANALISIS CLUSTER PROVINSI DI INDONESIA BERDASARKAN KONDISI KERUSAKAN DAN PERMUKAAN JALAN MENGGUNAKAN METODE *FUZZY C-MEANS*

PROVINCIAL CLUSTER ANALYSIS IN INDONESIA BASED ON CONDITIONS ROAD DAMAGE AND SURFACE USING FUZZY C-MEANS

Selly Anastassia Amellia Kharis*, Muhammad Givari Ramdhani

Program Studi Matematika, Jurusan Matematika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

*selly@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Infrastuktur jalan merupakan aset publik penting yang menjadi bagian dari pembangunan infrastuktur nasional. Dengan Infrastuktur jalan yang memadai, diharapkan mampu memberi kontribusi terhadap peningkatan kesejahteraan dan pertumbuhan ekonomi masyarakat. Kondisi Infrastuktur jalan di Indonesia saat ini sering mengalami kerusakan. Penelitian ini membahas pengelompokan provinsi dan kabupaten/kota berdasarkan kondisi kerusakan jalan dan kondisi permukaan jalan, sehingga dapat diketahui dengan jelas indikator permasalahan dalam suatu wilayah. Indikator-indikator permasalahan ini akan digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam pengambilan keputusan, dalam rangka terwujudnya pemerataan infrastuktur jalan di Indonesia. Tulisan ini membahas tentang penerapan metode Fuzzy C-Means untuk pengelompokan provinsi di Indonesia menurut kemiripan karaktrisik daerah. Analisis cluster provinsi di Indonesia berdasarkan kondisi dan jenis permukaan jalan menggunakan metode Fuzzy C-Means, optimal pada data dengan jumlah cluster tidak lebih dari empat. Analisis cluster ini dicirikan dengan nilai indeks validitas Dunn, FSI dan PCI mendekati satu, sedangkan untuk validitas XBI dan PEI dicirikan dengan nilai mendekati nol. Ukuran cluster optimal yang dipilih adalah: untuk Jalan Nasional sejumlah 3 cluster, Jalan Provinsi

sejumlah 5 cluster, dan Jalan kabupaten 2 cluster. Hasil cluster provinsi di Indonesia yang di peroleh dengan menggunakan metode Fuzzy C-Means dengan mengelompokan provinsi di Indonesia menurut kategori kondisi jalan yaitu kondisi rendah, cukup rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Sebaran hasil cluster tersebut cukup merata berdasarkan kewenangan jalan di Indonesia.

Kata Kunci: *analisis cluster, fuzzy c-means clustering, indeks validitas, principal component analysis.*

ABSTRACT

Road infrastructure is an important public asset that is part of national infrastructure development. With adequate road infrastructure, it is expected to be able to contribute to improving the welfare and economic growth of the community. The current condition of road infrastructure in Indonesia is often damaged. This study discusses the cluster of provinces and regencies or cities based on road damage and road surface conditions so that it can be clearly identified as the indicators that become problems in an area as a consideration in decision making in the context of realizing an equitable distribution of road infrastructure in Indonesia. This study discusses the application of the Fuzzy C-Means method for grouping provinces in Indonesia according to the similarity of regional characteristics. This province cluster analysis in Indonesia is based on the condition and type of road surface using the optimal Fuzzy C-Means method on data with no more than four clusters. which is characterized by the validity index value of Dunn, FSI, and PCI being close to one, while for the validity of XBI and PEI, it is characterized by a value close to zero. The optimal cluster size chosen for National Roads is 3 clusters; Provincial Roads are 5 clusters; and Regency Roads are 2 clusters. The results for the cluster of provinces in Indonesia were obtained using the Fuzzy C-Means method by grouping provinces in Indonesia according to the category of road conditions, namely low, moderate, medium, high, and very high conditions. The distribution of the results of the cluster is fairly even based on the authority of roads in Indonesia.

Keywords: *cluster analysis, fuzzy c-means clustering, validity index, principal component analysis.*

PENDAHULUAN

Pembangunan merupakan upaya sadar yang dilaksanakan oleh suatu bangsa, negara, dan pemerintah dalam rangka pencapaian tujuan nasional. Adapun tujuan pemerintah dan rakyat Indonesia tercantum dalam pembukaan Undang-Undang Dasar Negara Kesatuan Republik Indonesia (Suparji, 2021). Beragam usaha dari berbagai sektor terus dikembangkan dalam usaha pencapaian tujuan tersebut. Salah satu usaha yang dilakukan adalah dengan pembangunan infrastruktur. Pembangunan infrastruktur berperan signifikan dalam pengembangan wilayah dan sebagai roda penggerak pertumbuhan ekonomi (Sukwika, 2018). Namun demikian, luasnya wilayah Indonesia membuat pembangunan infrastruktur tidak merata.

Salah satu fokus pembangunan infrastruktur adalah pengadaan jalan yang sangat dibutuhkan oleh masyarakat Indonesia. Jalan merupakan prasarana angkutan darat yang sangat penting dalam memperlancar lalu lintas kendaraan termasuk bangunan pelengkapnya yang digunakan oleh lalu lintas untuk mendukung pembangunan (Triyanto, Syaiful, Rulhendri, 2020). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pembangunan infrastruktur jalan berpengaruh terhadap pembangunan ekonomi. Penelitian yang dilakukan Sukwika (2018) menyatakan bahwa terdapat korelasi positif antara kesenjangan infrastruktur, yang terdiri dari panjang jalan, (jumlah pelanggan) air bersih, dan luasan irigasi, dengan kesenjangan ekonomi di antara provinsi-provinsi di Indonesia. Prasetyo & Firdaus (2009) dalam penelitiannya menyatakan bahwa pertumbuhan ekonomi Indonesia dipengaruhi oleh ketersediaan infrastruktur, diantaranya elektrifikasi, jalan beraspal, dan air bersih. Infrastuktur jalan di Indonesia diharapkan mampu menghubungkan masyarakat daerah dan perkotaan, komunitas dan bisnis, menyediakan akses pendidikan, pekerjaan, sosial, dan pelayanan kesehatan. Oleh sebab itu, pengadaan jalan harus menjadi salah satu perhatian pemerintah dan masyarakat.

Salah satu permasalahan kondisi jalan yang sudah dibangun sampai saat ini adalah terjadinya kerusakan jalan (Rosalina, 2013). Kondisi jalan saat ini dikaitkan dengan konstruksi jalan yang tidak memadai dan dapat menyebabkan cacat

struktural seperti lubang dan penurunan tanah. Hal ini dapat mengakibatkan kecelakaan di jalan dan membahayakan pengguna jalan terutama pengendara sepeda atau motor roda dua. Faktor lain yang menyebabkan kerusakan jalan antara lain *drainase* yang tidak berfungsi sehingga mengakibatkan aliran air jalan menjadi tergenang, kondisi jalan tidak stabil karena struktur tanah *non-bearing*, kendaraan yang kelebihan muatan (*over tonase*) (Munggarani & Wibowo, 2017). Kendaraan yang kelebihan muatan seharusnya mematuhi peraturan yang ditetapkan oleh pemerintah terkait melalui Kementerian Perhubungan. Akibat pelanggaran yang dilakukan, kerusakan jalan dapat terjadi padahal kerusakan tersebut tidak dapat segera ditangani karena kurangnya pemeliharaan jalan secara berkala. Selain itu, faktor lain yang dapat menyebabkan kerusakan jalan adalah bencana alam.

Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2021, panjang jalan Indonesia pada tahun 2020 telah mencapai 548.366 kilometer. Berdasarkan tingkat kewenangan pembinaan, jalan di Indonesia terdiri dari berbagai jenis jalan antara lain jalan nasional, jalan provinsi, jalan kabupaten, dan jalan kota. Ditinjau dari tingkat kewenangan pembangunan, Jalan Kabupaten atau Kota menempati bagian terbesar yaitu mencapai 446.497 kilometer atau 81,42 persen dari total panjang jalan di Indonesia. Untuk Jalan negara dan Jalan provinsi adalah 47.024 kilometer dan 54.845 kilometer, atau 8,58 persen dan 10,00 persen dari total panjang jalan Indonesia. Sedangkan jika dilihat berdasarkan jenis permukaan, jalan di Indonesia terdiri dari jalan beraspal (*paved*) dan jalan tidak diaspal (*not paved*). Perincian menurut jenis permukaan jalan, jenis permukaan aspal cenderung memiliki pangsa terbesar dibandingkan dengan jenis jalan belum beraspal. Pada tahun 2020 jalan aspal sebesar 58,32 persen dari total panjang jalan. Sedangkan jalan belum diaspal mencapai 41,68 pesen. Jika dilihat berdasarkan kondisi jalan, jalan di Indonesia terdiri dari jalan dengan kondisi baik (*good*), sedang (*moderate*), rusak (*damaged*), dan rusak berat (*seriously damaged*). Perincian berdasarkan kondisi jalan terdiri dari 44,27 persen kondisi jalan di Indonesia dalam keadaan baik, 22,33 persen dalam keadaan sedang, 15,23 persen dalam keadaan rusak, dan 18,17 persen dalam keadaan rusak berat.

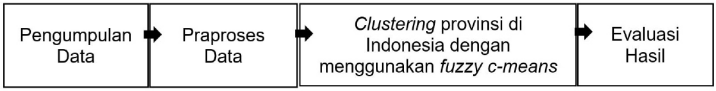
Dalam rangka mendorong pertumbuhan ekonomi nasional dan tercapainya konektivitas antarwilayah, pemerintah Indonesia telah menetapkan target pembangunan (Muhyiddin, 2020). Kemudahan akses yang ditimbulkan oleh ketersediaan jalan akan memberi dampak positif bagi kelangsungan transaksi perekonomian antar provinsi di Indonesia. Penelitian ini bertujuan mengelompokkan provinsi dan kabupaten atau kota berdasarkan kondisi kerusakan jalan dan kondisi permukaan jalan, sehingga dapat diketahui dengan jelas indikator yang menjadi permasalahan dalam suatu wilayah sebagai pertimbangan dalam pengambilan keputusan dalam rangka terwujudnya pemerataan infrastuktur jalan di Indonesia.

Analisis klaster merupakan salah satu alternatif yang tepat digunakan untuk mengelompokkan peta kerusakan jalan di Indonesia dan kondisi permukaan jalan. *Clustering* adalah proses pengelompokan data menjadi beberapa *cluster* atau kelompok dengan mengoptimumkan kesamaan data dalam *cluster* dan meminimasi kesamaan data antar gerombol (Steinbach et al, 2006). *Clustering* mengacu pada berbagai teknik yang sangat luas untuk menemukan subkelompok atau pengelompokan cluster dalam kumpulan data (Witten, James, Hastie, & Tibshirani, 2013). Salah satu metode *clustering* yang digunakan untuk penelitian ini yaitu *Fuzzy C-Means* (FCM). Metode FCM dapat merepresentasikan probabilitas suatu objek untuk dimasukkan ke dalam sebuah *cluster* dalam bentuk matriks derajat keanggotaan (Bezdek,1981). Metode ini berbeda dengan algoritma pengelompokan *K-Means* yang membatasi setiap pengamatan hanya pada satu anggota cluster. Oleh karena itu, jika data berjarak sama dari pusat *cluster* lain, metode *K-Means* tidak dapat memberikan hasil yang akurat.

Pada penelitian ini dibahas tentang penerapan metode *Fuzzy C-Means* untuk pengklasteran provinsi di Indonesia menurut kemiripan karaktrisik daerah yang ditinjau berdasarkan tujuh jenis peubah atau variabel. Variabel kondisi kerusakan jalan pada penelitian ini terdiri dari Jalan Rusak (*Damage*) dan Jalan Rusak Berat (*Badly Damage*) untuk variabel jenis permukaan jalan terdiri dari Jalan Aspal (*Paved*), Tidak Aspal (*Not Paved*), Jalan Krikil (*Gravel*), Jalan Tanah (*Soil*), dan Jenis Permukaan Jalan lainnya (*Other*). Temuan berupa hasil *clustering* dapat dijadikan acuan untuk menjelaskan sebaran panjang jalan dan pengelompokan kondisi jalan di Indonesia.

a. Tahapan Penelitian

Diagram alir dari analisis *cluster* provinsi di Indonesia berdasarkan kondisi kerusakan dan permukaan jalan menggunakan metode *fuzzy c-means* ditunjukkan pada Gambar 1 di bawah ini:



Gambar 1. Tahapan Penelitian Analisis *Cluster* Provinsi

Tahap pertama yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah pengumpulan data. Setelah data yang dikumpulkan lengkap, tahap penelitian berikutnya adalah praproses data yang terdiri dari normalisasi data dan analisis koefisien korelasi antarfaktor. Selanjutnya, dilakukan *clustering* provinsi di Indonesia dengan menggunakan *fuzzy c-means* berdasarkan jalan nasional, jalan provinsi, dan jalan kabupaten-kota. Setelah hasil *cluster* didapat, hasil tersebut divisualisasikan sehingga hasil dapat dipahami dengan lebih mudah. Tahap terakhir adalah evaluasi hasil *clustering*.

b. Analisis dan Eksplorasi Data

Penelitian ini menggunakan data statistik transportasi darat tahun 2020 (BPS, 2021). Data tersebut merupakan data sekunder yang diperoleh dari publikasi *website* Badan Pusat Statistik pada tahun 2021. Data terdiri dari tujuh peubah. Peubah X1 dan X2 merupakan jenis peubah yang mewakili kondisi jalan, sedangkan peubah X3, X4, X5, X6 dan X7 merupakan jenis peubah yang mewakili kondisi permukaan jalan. Jenis data dalam penelitian ini adalah peubah skala rasio dengan satuan yang digunakan adalah kilometer. Tabel 1 menunjukkan daftar peubah. Jumlah observasi terdiri dari 34 data yang merupakan provinsi di Indonesia yang masing-masing terdaftar dalam tiga dataset, yaitu jalan nasional, jalan negara, dan jalan kabupaten-kota.

Tabel 1. Daftar Peubah

Kode Peubah	Nama Peubah	Satuan
X_1	Rusak (*Damage*)	Kilometer
X_2	Rusak Berat (*Badly Damage*)	Kilometer
X_3	Aspal (*Paved*)	Kilometer
X_4	Tidak Diaspal (*Not Paved*)	Kilometer
X_5	Kerikil (*Grapel*)	Kilometer
X_6	Tanah (*Soil*)	Kilometer
X_7	Lainnya (*Other*)	Kilometer

Jalan nasional merupakan jalan arteri dan jalan kolektor dalam sistem jaringan jalan primer yang menghubungkan antar ibukota provinsi yang memiliki kepentingan strategis terhadap kepentingan nasional, dan jalan strategis nasional serta jalan tol. Kewenangan untuk mengelola jalan nasional berada di bawah pemerintah langsung baik melalui menteri atau pejabat yang ditunjuk (Dewi, Soemitro, Suprayitno, & Budianto, 2020). Jalan provinsi merupakan jalan kolektor dalam sistem jaringan jalan primer yang menghubungkan ibukota provinsi dengan ibukota kabupaten/kota, atau antaribukota kabupaten/kota, dan jalan strategis provinsi. Pengelolaan jalan provinsi berada di bawah pembinaan provinsi atau instansi yang ditunjuk (Setiawan, 2019).

Menurut Undang-Undang No. 38 Tahun 2004 tentang jalan, jalan lokal adalah jalan dalam sistem jaringan jalan primer yang tidak termasuk pada jalan nasional dan jalan provinsi, yang menghubungkan ibukota kabupaten dengan ibukota kecamatan, antaribukota kecamatan, ibukota kabupaten dengan pusat kegiatan lokal, antarpusat kegiatan lokal, serta jalan umum dalam sistem jaringan jalan sekunder dalam wilayah kabupaten, dan jalan strategis kabupaten. Jalan kota adalah jalan umum dalam sistem jaringan jalan sekunder yang menghubungkan antarpusat pelayanan dalam kota, menghubungkan pusat pelayanan dengan persil, menghubungkan antarpersil, serta menghubungkan antarpusat permukiman yang berada di dalam kota (Almufid, 2016). Selanjutnya ketiga dataset tersebut akan dilakukan *clustering* menggunakan metode Fuzzy C-Means.

c. Prosedur Analisis

Analisis dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak R Studio dengan pemrograman R versi 4.0.2. dan bahasa pemrograman Python dengan paket Pandas. Metode analisis data yang digunakan sebagai berikut:

1. Menggunakan analisis statistik untuk mengeksplorasi data dan menentukan sifat-sifat data (Soejoeti, 2014).
2. Praproses Data
   Tahapan dimulai dengan melakukan proses normalisasi data agar setiap atribut memilki dampak signifikan yang sama besar nantinya dalam proses data. Dilanjutkan dengan melakukan pemeriksaan data yang hilang (Agustini, Pradnyana, Darmawiguna, & Wijaya, 2022). Melakukan validasi dengan uji multikorelasi bertujuan untuk mengetahui ada tidaknya korelasi atau hubungan antar variabel bebas dari model (Ghozali, 2016). Jika ada korelasi yang kuat antara peubah, dapat diatasi dengan mengubah variabel asli dengan menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA) (Dunteman, 1989) dengan terlebih dahulu melakukan pengujian *KMO (Kaiser Meyer Olkin)* dan *Bartlett's.* Pengujian KMO dan Bartlett's bertujuan untuk memastikan bahwa data yang akan dianalisis layak digunakan dalam analisis PCA. Perhitungan PCA menggunakan persamaan (1).

$$PC_i = l_{1i}X_i + l_{2i}X_2 + \ldots + l_{ni}X_n \quad (1)$$

   di mana PC_i menunjukan komponen utama ke-*i* sedangkan $l_{ni}X_n$ variabel yang diamati.

3. Melakukan *clustering* menggunakan Fuzzy C-Means yang merupakan algoritma optimasi iterasi yang digagas Bezdek pada tahun 1981 (Ding, Feng, Andreu-Perez, & Pedrycz, 2022) sebagai berikut:
   a. Menentukan jumlah klaster (c), pangkat untuk partisi matriks (w), maksimal iterasi yang diharapkan (*Maxiter*), galat terkecil yang diharapkan (ξ), fungsi objektif awal $(\{P\}_0 = 0)$, dan iterasi awal (t = 1)

b. Menentukan nilai parameter bobot keanggotaan *m*. Menurut hasil penelitian, *m* = 2 merupakan nilai yang cocok dan umum digunakan untuk *m* (Höppner & Klawonn, 2001).

c. Menghasilkan bilangan acak $\eta_{ik}, i = 1,2,\ldots n;$ dan $k = 1,2 \ldots c.$

d. Perhitungan *centroid* klaster menggunakan persamaan (2)

$$V_{kj} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\left(\mu_{ik}\right)^{w} X_{ij}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(\mu_{ik}\right)^{w}} \quad (2)$$

Dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{c1} & \cdots & v_{cm} \end{bmatrix}$$

V_{kj} adalah pusat klaster ke-*k* untuk peubah ke-j, η_{ik} adalah derajat keanggotaan pada cluster ke-*k*, X_{ij} adalah data ke-*i* peubah ke-*j*

e. Perhitungan fungsi objektif pada iterasi ke-*t* menggunakan persamaan (3)

$$P_t = \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{c}\left(\left[\sum_{j=1}^{m}\{(X_{ij}\} - V_{kj})^2\right]\left(\mu_{ik}\right)^{w}\right) \quad (3)$$

P_t adalah fungsi objektif pada iterasi ke-*t*

f. Perhitungan perubahan matriks partisi dengan persamaan (4)

$$\mu_{ik} = \frac{\left[\sum_{j=1}^{m}(X_{ij} - V_{kj})^2\right]^{\frac{-1}{w-1}}}{\sum_{k=1}^{c}\left[\sum_{j=1}^{m}(X_{ij} - V_{kj})^2\right]^{\frac{-1}{w-1}}} \quad (4)$$

g. Melakukan cek kondisi berhenti: jika $\left(\left|P_t - P_{t-1}\right| < \varepsilon\right)$ atau $\left(\mathrm{t} > \mathrm{Maxiter}\right)$ maka berhenti. Jika tidak $t = t + 1$ mengulangi dengan langkah butir d.

4. Melakukan evaluasi hasil *clustering* menggunakan *Fuzzy Silhouette, Xie Beni index* dan *Coefficient Partition index* setelah mendapatkan cluster yang terbaik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis dan Eksplorasi Data

Karakteristik jalan di Indonesia berdasarkan tingkat kewenangan ditunjukkan pada Tabel 2. Jalan Nasional memiliki persentase kerusakan jalan terendah sementara Jalan Kabupaten memilki persentase kerusakan jalan yang tertinggi. Mayoritas provinsi di Indonesia memiliki kondisi permukaan jalan aspal yang cukup baik dengan persentase tinggi berdasarkan tingkat kewenangan jalan di Indonesia.

Tabel 2. Karakteristik Jalan di Indonesia Berdasarkan Tingkat Kewenangan Tahun 2020 (km)

Peubah	Jalan Nasional		Jalan Provinsi		Jalan Kabupaten	
	Mean	Persentase	Mean	Persentase	Mean	Persentase
Rusak	79,735	5%	205,705	10%	2170,147	12%
Rusak Berat	40,970	3%	205,117	10%	2715,647	15%
Aspal	1288,411	86%	1171,029	58%	6946,058	39%
Tidak Aspal	94,647	6%	-	-	-	-
Kerikil	-	-	220,382	11%	2767,823	15%
Tanah	-	-	126,029	6%	1971,735	11%
Lainnya	-	-	95,647	5%	1446,647	8%

Sumber: BPS, 2020

Jenis permukaan jalan yang menempati urutan dua terbesar sesudah Aspal yaitu Kerikil dengan persentase tertinggi berada pada Jalan Kabupaten sebesar 15% dan terendah pada Jalan Provinsi sebesar 11%. Adapun pada Jalan Nasional jenis permukaan jalan dikategorikan dengan jenis permukaan Tidak Aspal sebesar 6%.

2. Praproses Data

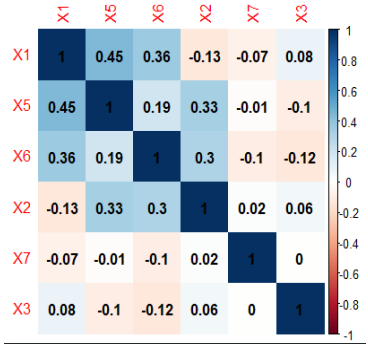
Tahap praproses data dilakukan untuk mengubah data mentah menjadi format yang lebih mudah dipahami dan efisien. Pada penelitian ini dilakukan praproses data dengan melakukan normalisasi peubah dan pendeteksian korelasi antar peubah. Normalisasi merupakan sebuah teknik dalam *logical desain* sebuah basis data, teknik pengelompokan atribut dari suatu relasi sehingga membentuk struktur relasi yang baik tanpa redudansi (Kadir, 2009). Tujuan normalisasi adalah mengorganisasikan data ke dalam tabel-tabel untuk meminimalkan kerangkapan data, mengurangi kompleksitas, mempermudah modifikasi data sehingga memudahkan pemakai (Latief, 2012). Setelah melakukan normalisasi, peubah memiliki rentang dan keragaman yang lebih homogen. Tabel 3 menunjukkan statistik deskriptif jalan di Indonesia berdasarkan tingkat kewenangan baik jalan nasional, jalan provinsi, dan jalan kabupaten-kota

Tabel 3. Statistik Deskriptif Jalan di Indonesia berdasarkan Tingkat Kewenangan

Peubah	Sebelum Normalisasi			Sesudah Normalisasi		
	Minimum	Maksimum	SB	Minimum	Maksimum	SB
Jalan Nasional						
X_1	1	445	86,625	-0,9089	4,2166	1
X_2	0	252	63,374	-0,6464	3,3298	1
X_3	0	2607	650,152	-1,9001	2,0281	1
X_4	0	425	122,513	-0,7725	2,6965	1
Jalan Provinsi						
X_1	20	952	167,540	-1,1084	4,4544	1
X_2	0	1395	304,087	-0,6745	3,9129	1,8150
X_3	91	6432	1070,854	-1,0086	4,9129	6,3916
X_5	0	1327	297,708	-0,7403	3,7171	1,7769
X_6	0	478	140,537	-0,8968	2,5045	0,8388
X_7	0	751	168,018	-0,5693	3,9005	1,0028
Jalan Kabupaten-Kota						
X_1	400	5565	1418,066	-1,3242	2,4012	1
X_2	464	11600	2295,032	-1,0241	3,8621	1,6184
X_3	997	33418	6916,239	-0.8911	3,7994	4,8772
X_5	19	7921	2269,061	-1,2589	2,2529	1,6001
X_6	10	6371	1630,849	-1,2494	0,4373	1,1500
X_7	6	5325	1553,662	-0,9539	0,7650	1,0956

Setelah proses normalisasi dilakukan, data diperiksa nilai korelasinya. Pemeriksaan nilai korelasi untuk melihat hubungan linear antar peubah. Perhitungan koefisien korelasi menggunakan rumus korelasi *Pearson Product Moment*. Gambar 2, 3 dan 4 menunjukkan hasil korelasi pada jalan nasional, jalan provinsi, dan jalan kabupaten – kota secara berturut-turut.

Gambar 2. Koefisen Korelasi Pearson Jalan Nasional



Gambar 3. Koefisen Korelasi Pearson Jalan Provinsi

Gambar 4. Koefisen Korelasi Pearson Jalan Kabupaten

Gambar 2 menunjukkan hubungan paling kuat antara peubah jalan rusak dan jalan tidak diaspal sebesar 0,65. Gambar 4 menunjukan hubungan paling kuat antar peubah jalan rusak dan jenis permukaan jalan kerikil sebesar 0,78. Pada Gambar 3 tidak terjadi hubungan yang kuat antar peubah. Hal ini ditandai dengan nilai korelasi (< 0,5). Setelah melakukan analisis korelasi dilanjutkan dengan pengujian *KMO, (Kaiser Meyer Olkin) dan Bartlett's.* Pengujian nilai KMO dilakukan untuk memastikan data yang akan di analisis cukup memadai untuk proses analisis menggunakan metode PCA. Sementara pengujian Bartlett's dilakukan untuk menguji ada tidaknya hubungan atau korelasi pada antar sampel sehingga layak digunakan dalam analisis PCA. Analisis PCA hanya dilakukan pada dataset Jalan Nasional karena memiliki nilai validitas yang cukup signifikan seperti tertera dalam Tabel 4. Berikut merupakan hasil uji KMO dan Bartlett's.

Tabel 4. Uji validitas KMO dan Bartlett's

Dataset	KMO	Hipotesis uji	Bartlett's			Hipotesis uji
			Khi-Squared	Df	P-Value	
Jalan Nasional	0.62	Terima H_0	219,12	3	2.2e-16	Tolak H_0
Jalan Provinsi	0.30	Tolak H_0	228,87	5	2.2e-16	Tolak H_0
Jalan Kabupaten - Kota	0.49	Tolak H_0	147,3	5	2.2e-16	Tolak H_0

Uji validitas KMO memiliki hipotesis sebagai berikut:
H_0 = Jumlah data memadai untuk melakukan analisis
H_1 = Jumlah data tidak cukup memadai untuk melakukan analisis.

Pada Tabel 4 didapat KMO = 0.62 untuk Jalan Nasional dengan tingkat signifikansi 0,05, maka terima H_0 karena KMO $0{,}62 > \alpha\,(0.05)$. Dengan tingkat kepercayaan 95% dapat ditarik

kesimpulan bahwa jumlah data cukup memadai untuk dilakukan analisis. Untuk uji validitas Bartlett's memiliki hipotesis uji sebagai berikut:

$H_0 : p = 1$ (Analisis Multivariabel tidak cukup digunakan)

$H_1 : p \neq 1$ (Analisis Multivariabel cukup digunakan)

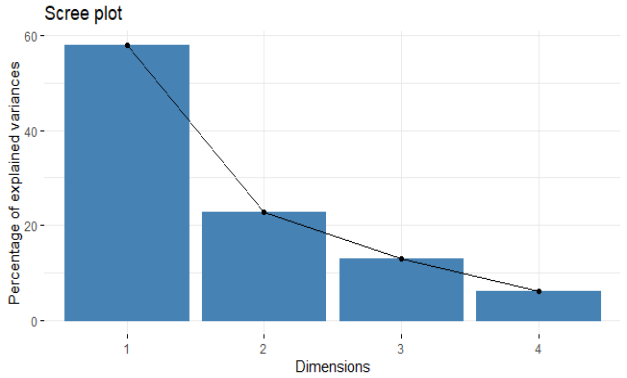
Berdasarkan Tabel 4 diperoleh nilai p-*value* atau nilai *sig* untuk Jalan Nasional yaitu 0,000, maka tolak H_0 karena p-*value* 0,000 $< \alpha(0.05)$. Dengan tingkat kepercayaan 95% dapat ditarik kesimpulan analisis multivariabel layak digunakan untuk analisis PCA. Pada Gambar 5 PCA menggambarkan peubah asal dengan ragam komulatif 80,82% sebanyak dua faktor untuk analisis cluster Jalan Nasional.

```
> #MELAKUKAN PROSES PCA
> pca <- prcomp(datascale)
> pca
Standard deviations (1, .., p=4):
[1] 1.5219925 0.9571513 0.7189486 0.5005129

Rotation (n x k) = (4 x 4):
          PC1         PC2         PC3         PC4
X1 0.5892457 -0.06200418 -0.33339976 -0.73334135
X2 0.5103786  0.18986152  0.83863173  0.01277246
X3 0.3525423 -0.86021826 -0.02540114  0.36755038
X4 0.5177037  0.46918294 -0.42999559  0.57179895
> summary(pca)
Importance of components:
                          PC1    PC2    PC3     PC4
Standard deviation     1.5220 0.9572 0.7189 0.50051
Proportion of Variance 0.5791 0.2290 0.1292 0.06263
Cumulative Proportion  0.5791 0.8082 0.9374 1.00000
```

Gambar 5. Nilai Kontribusi Varians Masing-Masing PC terhadap Data Jalan Nasional.

Data di atas selanjutnya menjadi kontribusi dasar pada diagram *scree plot*. Pada diagram *scree plot* garis curam tergambar pada PC1 menuju PC2. Kemudian garis tersebut melandai pada PC3 dan seterusnya. Hal ini menunjukan faktor optimal pada analisis PCA sebanyak dua faktor. Diagram *scree plot* disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram *Scree Plot* Jalan Nasional

3. Analisis *Cluster* Metode Fuzzy C-Means

a. *Cluster* Jalan Nasional

Analisis *cluster* untuk Jalan Nasional menggunakan dua komponen utama hasil analisis PCA dengan jumlah iterasi sebanyak 31 kali. Dengan klaster c = 3 berdasarkan penentuan Indeks Dunn sebesar 0,7397, jumlah klaster optimal dicirikan dengan semakin besar nilai indeks Dunn (Dunn, 1974). Jumlah observasi sebanyak 34 provinsi di Indonesia. Tabel 5 menunjukkan rata-rata cluster Jalan Nasional metode *Fuzzy C-Means* dengan c = 3.

Tabel 5 Rata-Rata *Cluster* Jalan Nasional Metode Fuzzy C-Means (c = 3)

Klaster	Rataan klaster	X_1	X_2	X_3	X_4	Kondisi
C1	0,8394	25,267	9,400	722,867	59,200	Rendah
C2	0,8220	87,500	29,786	1817,143	60,000	Sedang
C3	0,8107	221,400	167,000	1504,600	298,000	Tinggi

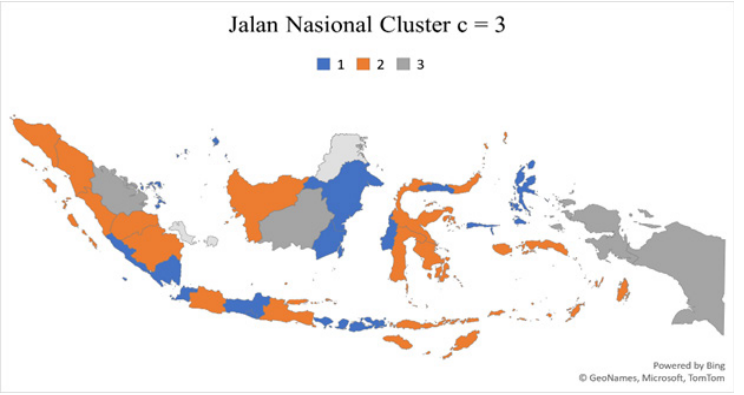
Berdasarkan rataan masing-masing peubah didapatkan karakteristik pada tiap klaster sebagai berikut:

Cluster 1 Memiliki kondisi kerusakan jalan rendah. Dengan jumlah keanggotaan sebanyak 14 provinsi dan jenis permukaan jalan tidak aspal memilki rataan yang rendah diantara tiga *cluster*.

Cluster 2 Memiliki kondisi kerusakan jalan sedang. Dengan jumlah keanggotaan sebanyak 15 provinsi dan jenis permukaan jalan tidak aspal memilki rataan yang sedang diantara tiga *cluster*.

Cluster 3 Memiliki kondisi kerusakan jalan tinggi. Dengan jumlah keanggotaan sebanyak 5 provinsi dan jenis permukaan jalan tidak aspal memiliki rataan yang tinggi diantara tiga *cluster*.

Visualisasi dari hasil cluster yang didapat berdasarkan kondisi dan jenis permukaan Jalan Nasional dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Peta Kondisi dan Jenis Permukaan Jalan Nasional

Pada Jalan Nasional, mayoritas provinsi di Pulau Jawa, Sumatera, Bali, Nusa Tenggara, Kalimantan Timur, Kalimantan Barat, dan Sulawesi masuk *cluster* 1 dan 2. Provinsi yang masuk ke dalam *cluster* 1 (berwarna biru) berarti memiliki kondisi kerusakan jalan rendah. Provinsi yang masuk ke dalam *cluster* 2 (berwarna *orange*) berarti memiliki kondisi kerusakan jalan

sedang. Hal ini berarti provinsi yang masuk ke dalam *cluster* 1 dan 2 memiliki kondisi Jalan Nasional dalam keadaan baik untuk daerah tersebut. Sedangkan provinsi yang masuk dalam *cluster* 3 (berwarna abu-abu) berarti memiliki kondisi kerusakan jalan tinggi. Provinsi Riau, Kalimantan Tengah, dan Papua masuk cluster 3.

b. *Cluster* Jalan Provinsi

Analisis cluster Jalan Provinsi dengan ukuran klaster optimal *c* = 5 yang dinilai dengan Index Dunn sebesar 0,4419. Dalam penelitian ini dipilih klaster *c* = 5 karena dapat menjelaskan karakteristik data yang beragam. Iterasi dilakukan sejumlah 59 kali dan jumlah observasi sebanyak 34 provinsi di Indonesia. Tabel 6 menunjukkan rata-rata cluster jalan provinsi metode *Fuzzy C-Means* dengan c = 5.

Tabel 6. Rata-Rata Cluster Jalan Provinsi Metode Fuzzy C-Means (c = 5)

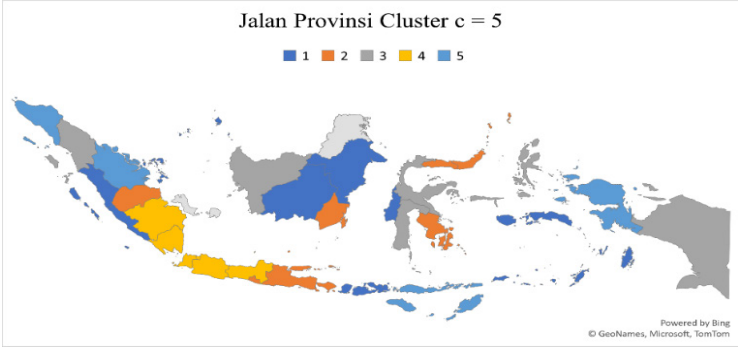
Klaster	Rataan klaster	X_1	X_2	X_3	X_5	X_6	X_7	Kondisi
C1	0,5860	215,625	112,875	770,125	203,125	164,500	26,750	Sedang
C2	0,4294	101,111	55,111	788,000	64,889	17,889	17,000	Rendah
C3	0,4636	383,333	320,833	1268,500	289,333	359,500	55,833	Sangat tinggi
C4	0,5061	189,571	63,714	1924,429	65,286	26,714	291,857	Cukup Rendah
C5	0,7550	183,000	801,000	1370,000	772,750	116,000	126,750	Tinggi

Berdasarkan rataan masing-masing peubah didapatkan karakteristik pada tiap klaster sebagai berikut:

Cluster 1 Memiliki rataan *cluster* 0,5860, kondisi kerusakan jalan sedang. Dengan jenis permukaan jalan tanah dan kerikil memiliki rataan sedang, jumlah keanggotaan sebanyak 8 provinsi.

Cluster 2	Memiliki rataan *cluster* 0,4294, kondisi kerusakan jalan rendah. Dengan jenis permukaan jalan tanah dan kerikil memiliki rataan paling rendah, jumlah keanggotan sebanyak 9 provinsi.
Cluster 3	Memiliki rataan *cluster* 0,4636, kondisi kerusakan jalan sangat tinggi. Dengan jenis permukaan jalan tanah dan kerikil memiliki rataan yang paling tinggi, jumlah keanggotan sebanyak 6 provinsi.
Cluster 4	Memiliki rataan *cluster* 0,5061, kondisi kerusakan jalan cukup rendah. Dengan jenis permukaan jalan tanah dan kerikil memiliki rataan cukup rendah, jumlah keanggotan sebanyak 7 provinsi.
Cluster 5	Memiliki rataan *cluster* 0,7550, kondisi kerusakan jalan tinggi. Dengan jenis permukaan jalan tanah dan kerikil memiliki rataan tinggi, jumlah keanggotan sebanyak 4 provinsi.

Visualisasi dari hasil *cluster* yang didapat berdasarkan kondisi dan jenis permukaan jalan provinsi dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Peta Kondisi dan Jenis Permukaan Jalan Provinsi

Pada jalan provinsi terdapat 5 *cluster*. *Cluster* 1 memiliki kondisi kerusakan jalan sedang dengan rataan *cluster* 0,5860. *Cluster* 2 memiliki kondisi kerusakan jalan lebih rendah dibandingkan dengan *cluster* 1 dengan rataan *cluster* 0,4294. *Cluster* 3 memiliki kondisi kerusakan jalan sangat tinggi dengan rataan *cluster* 0,4636. *Cluster* 4 memiliki kondisi kerusakan jalan cukup rendah dengan rataan 0,5061. *Cluster* 5 memiliki kondisi kerusakan jalan tinggi dengan rataan *cluster* 0,7550. *Cluster* 2 dan 4 merupakan jenis jalan dengan kondisi rendah dan cukup rendah. Mayoritas provinsi di pulau Jawa, Bali dan Sumatera masuk cluster ini. Cluster 1 kondisi jalan sedang sebagian provinsi di pulau Sumatra dan Kalimantan masuk cluster ini. Cluster 3 dan 5 jenis jalan dengan kondisi tinggi dan sangat tinggi Sebagian provinsi di pulau Sumatra, Sulawesi dan Papua masuk cluster ini.

c. *Cluster* Jalan Kabupaten - Kota

Analisis cluster Jalan Kabupaten dengan ukuran klaster optimal c = 2 yang dinilai dengan Index Dunn sebesar 0,7326. Iterasi dilakukan sejumlah 24 kali dan jumlah observasi sebanyak 33 provinsi di Indonesia. Berdasarkan Peraturan Pemerintah RI No. 34 Tahun 2006 tentang Jalan bahwa status jalan di Provinsi DKI Jakarta hanya jalan nasional dan jalan provinsi sehingga DKI Jakarta tidak memiliki jalan kabupaten – kota akibatnya data terdiri dari 33 provinsi. Tabel 7 menunjukkan rata-rata *cluster* jalan provinsi metode *Fuzzy C-Means* dengan c = 2.

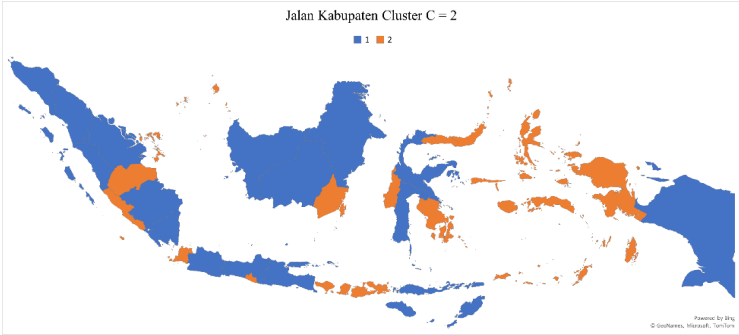
Tabel 7. Rata-rata cluster Jalan Provinsi Metode Fuzzy C-Means (c = 2)

Klaster	Rataan Klaster	X_1	X_2	X_3	X_5	X_6	X_7	Kondisi
C1	0,7187	3365,563	4309,625	11123,313	4197,500	2891,375	2646,313	Sangat Tinggi
C2	0,8954	1172,706	1375,176	3423,118	1585,059	1222,176	402,647	Tinggi

Berdasarkan rataan masing-masing peubah didapatkan karakteristik pada tiap klaster sebagai berikut:

Cluster 1	Memiliki rataan *cluster* satu sebesar 0,7187 kondisi kerusakan jalan sangat tinggi. Dengan jenis permukaan jalan tanah dan kerikil memiliki rataan yang sangat tinggi, jumlah keanggotan sebanyak 16 provinsi.
Cluster 2	Memiliki rataan *cluster* dua sebesar 0,8954 kondisi kerusakan jalan tinggi. Dengan jenis permukaan jalan tanah dan kerikil memiliki rataan tinggi, jumlah keanggotan sebanyak 17 provinsi.

Visualisasi dari hasil *cluster* yang didapat berdasarkan kondisi dan jenis permukaan jalan kabupaten - kota dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Peta Kondisi dan Jenis Permukaan Jalan Kabupaten

Pada jalan kabupaten – kota terdapat dua *cluster*, yaitu kondisi sangat tinggi dan tinggi. *Cluster 1* memiliki rataan *cluster* sebesar 0,7187 dengan kondisi kerusakan jalan sangat tinggi. Sedangkan untuk *cluster* 2 memiliki rataan *cluster* sebesar 0,8954 dengan kondisi kerusakan jalan tinggi. Untuk jalan kabupaten memiliki angka kerusakan jalan per kilometer dan jenis permukaan jalan per kilometer terbesar dibandingkan Jalan Nasional dan Jalan Provinsi. Untuk cluster 1 dan 2 Jenis jalan dengan kondisi Tinggi dan Sangat tinggi.

d. Evaluasi Hasil *Cluster Fuzzy C-Means*

Penentuan suatu provinsi dapat masuk ke dalam *cluster* tertentu berdasarkan metode *clustering* dengan konsep atau algoritma *Fuzzy C-Means* (FCM) diukur dari derajat nilai keanggotaan yang dimiliki provinsi tersebut. Semakin tinggi sebuah nilai derajat keanggotaaanya maka besar kecenderungan menjadi anggota *cluster* tersebut. Tabel 8 menunjukkan validitas *Fuzzy C-Means*.

Tabel 8. Validitas Fuzzy C-Means

Dataset	FSI	XBI	PCI	PEI
Jalan Nasional	0.7242	0.0048	0.7396	0.4752
Jalan Provinsi	0.3292	0.0197	0.4419	1.1322
Jalan Kabupaten – Kota	0.6624	0.0078	0.7326	0.4173

Evaluasi validitas *Silhoutte Index* mengukur kemiripan suatu objek dengan cluster sendiri dibandingkan nilai cluster lain (Rousseeuw, 1987). Nilai tersebut berkisar $-1 \le s(i) \le 1$, yang mana nilai tertinggi adalah objek yang memiliki kecocokan dengan klaster sendiri dan tidak memiliki kecocokan dengan klaster tetangga. Apabila sebagian besar objek mempunyai nilai yang tinggi maka konfigurasi *clustering* telah sesuai. Sebaliknya apabila objek memiliki banyak titik bernilai rendah atau negatif maka konfigurasi *clustering* terlalu banyak atau terlalu sedikit klaster. Data Jalan Nasional dan Jalan Provinsi masing-masing memiliki nilai FSI 0.7242 dan 0.6624 yang mana nilai $S(i)$ mendekati satu. *Xie Beni index* mengukur jarak antara klaster dan jumlah data untuk menentukan nilai indeks. Semakin kecil nilai *Xie Beni Index* suatu jumlah klister, maka menunjukkan jumlah klaster tersebut semakin optimal. Dari ketiga data pada Tabel 8 terlihat nilai XBI mendekati nol, artinya hasil klaster sudah optimal.

Evaluasi validitas dengan menghitung *Partition Coefficient Index* sebagai penilaian keanggotaan data pada tiap klaster (Bazdek,1981). Nilai *Partition Coefficient Index* hanya mengukur evaluasi nilai derajat keanggotaan *cluster*, tanpa evaluasi data atau vector, yang mana mengandung informasi sebaran data. Rentang nilainya berkisar $0 \le PC \le 1$. Dengan rentang nilai yang

mendekati satu berarti kualitas *cluster* yang didapat semakin baik. Data Jalan Nasional dan Jalan Provinsi masing-masing memiliki nilai PCI 0.7396 dan 0.7326. Evaluasi validitas *Partition Entropi Index* menunjukan nilai mendekati 0 menunjukan bahwa kualitas klaster yang di dapat adalah baik. Dari evaluasi di atas hasil klaster dari tiga dataset sudah terlihat baik, dicirikan dengan nilai FSI dan PCI yang mendekati satu, untuk nilai XBI dan PEI mendekati nol.

Cluster-cluster yang terbentuk baik pada Jalan Nasional, Jalan Provinsi, maupun Jalan Kabupaten–Kota dapat menjadi rujukan pemerintah dalam menetapkan pembangunan infrastruktur. Pemerintah dapat menetapkan prioritas pembangunan dengan melihat kelompok-kelompok atau *cluster* yang terbentuk. Selain itu, pengelompokan yang telah diteliti dapat menjadi referensi untuk pemerintah pusat, pemerintah daerah, dan instansi terkait untuk melaksanakan kewenangannya. Misal: pemerintah daerah setelah mengetahui *cluster* daerahnya dapat mengalokasikan besaran APBD untuk pembangunan infrastruktur khususnya Jalan Provinsi. Begitupun dengan pemerintah kabupaten-kota dapat menetapkan anggaran yang sesuai untuk perbaikan daerahnya. Hasil *cluster* yang telah didapat pada penelitian ini dapat dijadikan acuan untuk menjelaskan sebaran panjang jalan dan pengelompokan kondisi jalan di Indonesia. Jika semua pihak telah mengetahui posisi *cluster* masing-masing, pembangunan infrastruktur dapat mempunyai pedoman yang jelas dan berdasarkan hal ilmiah.

KESIMPULAN

Ukuran *cluster* optimal yang dipilih untuk Jalan Nasional sejumlah 3 *cluster*, Jalan Provinsi sejumlah 5 *cluster* dan Jalan kabupaten 2 *cluster*. Hasil *cluster* provinsi di Indonesia yang diperoleh dengan menggunakan metode *Fuzzy C-Means* dengan mengelompokkan provinsi di Indonesia berdasarkan kategori kondisi jalan yaitu kondisi rendah, cukup rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi. Sebaran hasil *cluster* tersebut cukup merata berdasarkan kewenangan jalan di Indonesia. Provinsi Riau, Papua dan Papua Barat merupakan provinsi dengan kategori kondisi permukaan dan kerusakan Jalan Nasional, Jalan

Provinsi dan Jalan Kabupaten tertinggi di Indonesia. Provinsi DKI Jakarta, Banten, D.I. Yogyakarta, Lampung dan Bangka Belitung merupakan provinsi dengan kategori kondisi permukaan dan kerusakan Jalan Nasional dan Jalan Provinsi terendah.

DAFTAR PUSTAKA

Agustini, K., Pradnyana, G. A., Darmawiguna, I. G. M., & Wijaya, I. N. S. W. (2022). Data Mining. Tangerang Selatan: Universitas Terbuka.

Almufid, A. (2016). Perencanaan Geometerik Jalan Agar Mencapai Kenyamanan dan Keamanan Bagi Penggunaan Jalan Sesuai Undang-Undang No. 38 tahun 2012 Tentang Jalan. *Jurnal Dinamika UMT*, *1*(2), 34-45.

BPS [Badan Pusat Statistik]. (2021). Statistika Trasportasi Darat 2020, Jakarta: Badan Pusat Statistik.

Bezdek J. C. (1981). Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Alghorithm.Spring Street (NY): Plenum.

Ding, W., Feng, Z., Andreu-Perez, J., & Pedrycz, W. (2022). Derived Multi-population Genetic Algorithm for Adaptive Fuzzy C-Means Clustering. Neural Processing Letters, 1-25.

Dunn, J. C. (1974). Well-separated Clusters and Optimal Fuzzy Partitions. *Journal of Cybernetics,* 4(1), 95-104.

Dewi, D. K., Soemitro, R. A. A., Suprayitno, H., & Budianto, H. (2020). Pemanfaatan Bagian-Bagian Jalan Nasional, Studi Kasus di Ruas Jalan MERR Surabaya. *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas,* 4(3), 235-248.

Dunteman, G. H. (1989). Principal components analysis (No. 69). Newbury Park: Sage.

Ghozali, I. (2016). *Aplikasi Analisis Multivariete Dengan Program IBM SPSS 23*. Edisi 8. Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro.

Höppner, F. & Klawonn, F. (2001). A new approach to fuzzy partitioning. Vol. 3. Hal 1419 - 1424 10.1109/NAFIPS.2001.943757.

Kadir, A. (2009). Dasar dan Perancangan Database Relational. Yogyakarta: Andi

Latief, M. (2012). Pendekatan Database untuk Manajemen Data dalam Meningkatkan Kemampuan Mahasiswa Mengaplikasikan Konsep Basisdata. Prosiding Aptekindo, 6(1).

Munggarani, N. A., & Wibowo, A. (2017). Kajian faktor-faktor penyebab kerusakan dini perkerasan jalan lentur dan pengaruhnya terhadap biaya penanganan. *Jurnal Infrastruktur*, *3*(01), 9-18.

Muhyiddin, M. (2020). Covid-19, New Normal, dan Perencanaan Pembangunan di Indonesia. *Jurnal Perencanaan Pembangunan: The Indonesian Journal of Development Planning*, *4*(2), 240-252

Prasetyo, R.B. & Firdaus, M. (2009). Pengaruh Infrastruktur pada Pertumbuhan Ekonomi Wilayah Indonesia. *Jurnal Ekonomi dan Kebijakan Pembangunan*, 2(2), 222-236.

Rosalina, D. (2013). Sistem Manajemen Pemeliharaan Perkerasan Jalan Dengan Metode Manual Pemeliharaan Rutin Jalan Untuk Jalan Nasional dan Provinsi Tahun 2011 (Review Manual No.001/T/BT/1995) dan Metode PCI (Pavement Condition Index),Thesis, Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A Graphical Aid to The Interpretation and Validation of Cluster analysis. *Journal of computational and applied mathematics*, *20*, hal. 53-65.

Setiawan, A. (2019). Penentuan Skala Prioritas Penanganan Ruas Jalan Provinsi di Kabupaten Purwakarta. *Jurnal Soshum Insentif,* 2(1), 61-69.

Soejoeti, Z. (2014). Metode Statistika I (Edisi 1). Tangerang Selatan: Universitas Terbuka

Steinbach, M., Kumar, V., & Tan, P. (2006). Introduction to Data Mining. Jerman: Pearson Addison Wesley

Suparji, S. (2021). Implementasi Prinsip Good Governance dalam Sistem Pengelolaan Keuangan Daerah di Indonesia. *Jurnal Magister Ilmu Hukum*, *4*(1), 1-5.

Sukwika, T (2018). Peran Pembangunan Infrastruktur terhadap Ketimpangan Ekonomi Antarwilayah di Indonesia. *Jurnal Wilayah dan Lingkungan,* 6(2), 115-130.

Triyanto, T., Syaiful, S., & Rulhendri, R. (2020). Evaluasi Tingkat Kerusakan Jalan Pada Lapis Permukaan Ruas Jalan Tegar Beriman Kabupaten Bogor. *ASTONJADRO*: *CEAESJ,* 8(2), 70-79.

Witten, D., James, G., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). An Introduction to Statistical Learning: With Applications in R. Jerman: Springer New York.

INTEGRAL HENSTOCK-KURZWEIL: INOVASI DALAM PERKEMBANGAN TEORI INTEGRAL DAN PENERAPANNYA PADA BEBERAPA MASALAH PERSAMAAN DIFERENSIAL

HENSTOCK-KURZWEIL INTEGRAL: INNOVATION IN THE DEVELOPMENT OF INTEGRAL THEORY AND ITS APPLICATION TO SOME DIFFERENTIAL EQUATION PROBLEMS

Elin Herlinawati

Program Studi Matematika, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

elin@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Masyarakat 5.0 merupakan suatu konsep mengenai keseimbangan teknologi dan peran manusia sebagai pusat kontrol teknologi tersebut. Dalam hal ini kecepatan perkembangan teknologi harus diiringi dengan percepatan inovasi berkelanjutan di berbagai bidang keilmuan. Adapun inovasi pengetahuan pada ilmu Matematika semakin berkembang termasuk pada teori-teori Matematika Analisis. Salah satu teori yang banyak digunakan adalah teori integral. Pada artikel ini, akan dipelajari integral Henstock-Kurzweil sebagai salah satu inovasi dalam perkembangan teori integral dan aplikasinya pada beberapa masalah persamaan diferensial. Sebagai contoh, akan dibahas masalah eksistensi solusi dari persamaan diferensial yang mengandung fungsi-fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil. Eksistensi solusi persamaan Schrödinger yang juga digunakan dalam mekanika kuantum khususnya untuk memodelkan pergerakan gelombang, serta eksistensi solusi persamaan diferensial Strum-Liouville yang banyak digunakan pada bidang fisika dan mekanika kuantum.

Kata Kunci: *henstock-kurzweil, persamaan diferensial, schrödinger, sturm-liouville.*

ABSTRACT

Society 5.0 is a concept about balancing technology and the role of humans as the center of technology control. The accelerating technological development to achieve Society 5.0 must be accompanied by the acceleration of continuous innovation in various fields. Knowledge innovation in Mathematics continues to grow, including the theories of Mathematical Analysis. One of the theories that are widely used in various fields is integral theory. In this article, we study the Henstock-Kurzweil integral as one of the innovations in the development of integral theory and its application to several differential equation problems. For example, we discuss the problem of the existence of solutions to differential equations containing integrated functions of Henstock-Kurzweil. The existence of solutions to the Schrödinger equation, which is also used in quantum mechanics, especially for modelling the movement of waves, and the Strum-Liouville differential equation, widely used in physics and quantum mechanics.

Keyword: *henstock-kurzweil, differential equation, schrödinger, sturm-liouville.*

PENDAHULUAN

Seiring perkembangan zaman, kemajuan teknologi informasi dan komunikasi telah memunculkan terjadinya transformasi digital yang mengubah tatanan industri (Fukuyama, 2018). Transformasi tersebut menjadi salah satu faktor terciptanya konsep Revolusi Industri 4.0. Seperti halnya kecanggihan *internet of things* (IoT), *artificial intellegence* (AI), dan robotik yang telah membawa perubahan nyata dan signifikan kepada masyarakat (Fukuyama, 2018). Melalui berbagai kecanggihan tersebut, manusia menjadi mudah dan cepat dalam menemukan solusi dari berbagai masalah sosial. Selain itu, pemanfaatan teknologi tersebut juga dapat menggantikan berbagai pekerjaan fisik sehingga proses pekerjaan menjadi lebih efisien dalam hal waktu dan tenaga (Potocan et al., 2020). Namun, konsep otomatisasi yang dihasilkan dari era Revolusi Industri 4.0 memicu degradasi peran manusia dalam kehidupan. Sebagai contoh, di Indonesia, penggantian manusia dengan robot pada beberapa bidang pekerjaan telah mengurangi lapangan pekerjaan sehingga berdampak negatif khususnya pada sektor finansial dan kesejahteraan hidup. Sementara itu, di Jepang, beberapa fenomena sosial akibat ketidakseimbangan antara peran manusia dan teknologi dapat dilihat dari penurunan tingkat pertumbuhan penduduk dan jumlah penduduk usia produktif, peningkatan efek rumah kaca, dan lainnya (Fukuyama, 2018). Berdasarkan fenomena tersebut, Jepang merancang suatu konsep yang merupakan pengembangan dari Revolusi Industri 4.0 dan dinamakan sebagai *Society 5.0* atau Masyarakat 5.0 (Fukuyama, 2018).

Masyarakat 5.0 adalah sebuah konsep pembangunan masyarakat yang berpusat pada manusia yang menyelaraskan kemajuan ekonomi dan pemecahan berbagai masalah sosial oleh sebuah sistem yang mengkolaborasikan dunia *digital* dan dunia nyata, serta dapat menciptakan keberlanjutan (Faruqi, 2019). Oleh karena itu, dengan memasuki era Masyarakat 5.0, penggunaan teknologi mulai memperhatikan aspek-aspek humaniora (Yasa et al., 2021). Tujuan utama dari konsep Masyarakat 5.0 adalah untuk membangun masyarakat yang berpusat pada manusia, serta membuat setiap individu

dapat menikmati hidup yang berkualitas (Fukuyama, 2018). Untuk mewujudkan tujuan tersebut, beberapa teknologi dikembangkan untuk mengintegrasikan konsep otomatisasi dan humanisasi. Teknologi-teknologi tersebut tidak terlepas dari peran matematika dan sains dalam mengembangkan berbagai inovasi pengetahuan dan teknologi. Dalam hal ini, kecepatan perkembangan teknologi untuk mencapai Masyarakat 5.0 harus diiringi dengan percepatan inovasi berkelanjutan di berbagai bidang termasuk bidang ilmu dasar seperti Matematika.

Penelitian Matematika yang telah dilakukan menjadi salah satu dasar bagi pengembangan berbagai teknologi yang tercipta saat ini sehingga mendukung percepatan inovasi berkelanjutan di era Masyarakat 5.0. Sebagai contoh, teori himpunan dan logika *fuzzy* mendasari terciptanya mesin cuci otomatis (*fuzzy washing machine*) yang dapat mendeteksi jumlah muatan pakaian, jumlah air yang dibutuhkan, serta waktu pencucian sehingga proses pencucian menjadi lebih mudah dan efisien. Contoh lain adalah penggunaan persamaan diferensial untuk memodelkan berbagai fenomena dan memprediksi solusi yang bisa diterapkan pada fenomena tersebut. Inovasi pengetahuan pada ilmu Matematika tersebut terus berkembang termasuk pada teori Matematika Analisis. Salah satu konsep atau teori Matematika Analisis yang banyak digunakan di berbagai bidang ilmu dan berperan dalam pengembangan teknologi adalah teori integral.

Teori integral modern mulai dikenal pada abad ke-17 dengan penemuan Teorema Dasar Kalkulus oleh Leibniz dan Newton. Teorema tersebut menyebutkan hubungan antara integrasi dan diferensiasi. Pada perkembangannya, analisis mengenai teori integral dilakukan untuk menyempurnakan teori yang sudah ditemukan sebelumnya. Sebagai contoh, pemanfaatan integral Riemann tidak hanya pada bidang Matematika saja, melainkan pada bidang Fisika dan Teknik. Perkembangan berbagai macam fungsi pada area tersebut menyebabkan mulai diketahuinya fungsi-fungsi yang ternyata tidak dapat diintegralkan dengan konsep integral Riemann pada interval tertutup dan terbatas, misalnya fungsi Dirichlet pada selang [0,1]. Oleh karena itu, Henri Lebesgue mengatasi

hal tersebut dengan membangun integral berdasarkan ukuran sehingga fungsi Dirichlet menjadi terintegralkan pada [0,1]. Integral tersebut dikenal sebagai integral Lebesgue. Setelah mempelajari sifat-sifat integral Lebesgue, ternyata juga masih ditemukan fungsi kontinu F pada [0,1] yang tak terintegralkan oleh integral Lebesgue walaupun F' berhingga pada [0,1] Untuk mengatasi hal tersebut, Denjoy dan Perron mendefinisikan integral yang lebih umum dari integral Lebesgue maupun integral Riemann.

Pada tahun 1957, Kurzweil memberikan definisi integral yang ternyata ekuivalen dengan integral Denjoy dan integral Perron. Disisi lain, pada tahun 1968, Henstock secara terpisah juga menyampaikan definisi yang ternyata ekuivalen dengan Kurzweil. Selanjutnya, integral ini kemudian dikenal sebagai integral Henstock-Kurzweil (Lee, 1989; Lee, 2013; Lee et al., 2020; Lee, 2011). Sifat-sifat dari fungsi-fungsi yang terintegralkan Henstock-Kurzweil tersebut kemudian diperluas pada dimensi-n (Lee, 2011; Herlinawati, 2021). Selain itu juga konsep integral tersebut dapat disematkan dalam teori Matematika lainnya yaitu untuk mengkonstruksi suatu ruang fungsi seperti ruang Henstock-Orlicz yang dilakukan oleh Hazarika dan Kalita (2021). Konsep ini kemudian berkembang hingga ditemukan sifat inklusi pada ruang fungsi ini (Herlinawati, 2022).

Pentingnya peran teori integral dan diferensiasi di berbagai bidang memunculkan berbagai fungsi-fungsi dengan karakteristik khusus, seperti fungsi Henstock-Kurzweil. Hal ini membuat para matematikawan termotivasi untuk melakukan berbagai inovasi pengetahuan di area tersebut. Eksistensi dari solusi masalah persamaan diferensial tersebut menjadi perhatian utama untuk diteliti. Beberapa penelitian mengenai persamaan diferensial yang mengandung fungsi-fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil telah dikembangkan oleh beberapa peneliti antara lain tentang persamaan diferensial dan integral dengan fungsi integral Henstock-Kurzweil (Heikkilä, 2011), penerapan integral Henstock-Kurzweil pada interval tak terbatas untuk persamaan diferensial dan integral (Borkowski dan Bugajewska, 2018), integral distribusi Henstock-Kurzweil dan aplikasinya (Ye & Liu, 2016). Eksistensi dari solusi periodik dan titik bifurkasi untuk perumuman persamaan diferensial

biasa (Federson et al., 2021), turunan Riemann-Liouville atas ruang fungsi distribusi integral (Morales Macías et al., 2018), solusi ekstremal dari sistem persamaan diferensial ukuran dan aplikasinya dalam mempelajari masalah turunan Stieltjes (Lopez Pouso et al., 2018), serta eksistensi dan ketunggalan dari solusi persamaan diferensial terdistribusi yang mengandung integral Henstock-Stieltjes (Ye et al., 2019).

Oleh karena itu, pada artikel ini dibahas mengenai integral Henstock-Kurzweil sebagai salah satu inovasi dalam perkembangan teori integral dan aplikasinya pada beberapa masalah persamaan diferensial seperti masalah eksistensi solusi dari persamaan diferensial yang mengandung fungsi-fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil, persamaan Schrödinger yang juga digunakan dalam mekanika kuantum khususnya untuk memodelkan pergerakan gelombang, serta persamaan diferensial Strum-Liouville yang banyak digunakan pada bidang fisika dan mekanika kuantum.

PEMBAHASAN

1. Inovasi Perkembangan Teori Integral

Perkembangan ilmu pengetahuan pada area teori integral sudah muncul sejak zaman sebelum masehi (SM). Hal ini ditandai dengan ide yang dikemukakan oleh seorang matematikawan sekaligus fisikawan dari Yunani, yaitu Archimides pada tahun 287-212 SM, mengenai integral. Archimides menggunakan ide penjumlahan untuk menghitung luas daerah tertutup dan volum dari benda putar. Ide tersebut merupakan cikal bakal salah satu konsep dasar dari Kalkulus Integral. Selain Archimides, matematikawan yang juga berkontribusi terhadap perkembangan Kalkulus Integral adalah Ibn Al-Haytham atau Alhazen, matematikawan asal Irak pada tahun 1000-an M. Alhazen menurunkan rumus umum dari hasil pangkat integral. Kemudian, setelah konsep limit dan derivatif diperkenalkan oleh Leibniz, muncul pendekatan baru untuk integral. Hal ini menginisiasi kemunculan era modern teori integral.

Teori integral modern mulai dikenal pada abad ke-17 dengan penemuan Teorema Dasar Kalkulus oleh Leibniz dan Newton. Teorema tersebut menyebutkan hubungan antara

integrasi dan diferensiasi. Simbol integral yang dikenal saat ini diperkenalkan oleh Gottfried Wilhelm Leibniz pada tahun 1675 dengan mengadaptasi simbol integral $\int$ dari lambang *ſ* yang merupakan singkatan dari *summa* yang artinya "jumlah/total", sedangkan notasi integral dengan batas atas dan batas bawah digunakan pertama kali oleh Joseph Fourier pada tahun 1918-2020. Selanjutnya, berbagai inovasi dari perkembangan teori integral dapat dilihat dari beberapa konsep baru yang muncul sebagai pelengkap dari hasil yang telah ditemukan oleh matematikawan pada era sebelumnya. Adapun beberapa inovasi tersebut antara lain sebagai berikut.

a. Integral Newton

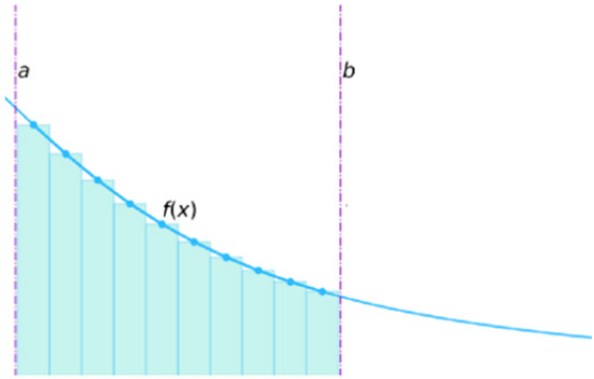
Newton mendefinisikan integral fungsi *f* pada $[a,b]$ melalui pendefinisian fungsi antiderivatif *F* pada $[a,b]$, yaitu fungsi bernilai real pada $[a,b]$ dengan $F'(x)=f(x)$ untuk setiap $x\in[a,b]$ jika *F* kontinu pada $[a,b]$ (Indrati, 2017). Berdasarkan konsep tersebut, Newton mendefinisikan nilai integral *f* pada $[a,b]$ sebagai $F(a)-F(b)$, ditulis

$$(N)\int_a^b f(x)dx = F(a)-F(b).$$

b. Integral Riemann dan Integral Darboux

Era modern teori integral dimulai dengan hasil penelitian dari matematikawan asal Prancis, Augustin Louis Cauchy (1789-1857). Pada tahun 1823, Cauchy mendefinisikan integral fungsi kontinu pada $[a,b]$ dengan menggunakan konsep limit. Hasil dari Cauchy ini kemudian disempurnakan oleh Bernhard Riemann (1826-1866), matematikawan dari Jerman. Pada tahun 1854, Riemann mendefinisikan integral fungsi terbatas pada $[a,b]$. Kedua integral tersebut ternyata ekuivalen dan lebih dikenal sebagai integral Riemann (Lee dan Vyborny, 2000).

Secara sederhana, integral dapat dipandang sebagai luas daerah di bawah kurva. Gagasan dasar integral Riemann adalah menggunakan hampiran sederhana untuk daerah di bawah kurva.



Sumber: https://towardsdatascience.com/

Gambar 1. Ilustrasi Integral Riemann

Pada Gambar 1, luasan di bawah kurva dipartisi menjadi beberapa bagian. Adapun pengertian partisi dijelaskan pada Definisi 1.

Definisi 1 (Soemantri, 2014). Diberikan fungsi real *f* yang didefinisikan dan terbatas pada interval tertutup $[a,b]$, jadi terdapat bilangan real *m* dan *M* sehingga $m \le f(x) \le M$ untuk $x \in [a,b]$. Partisi *P* dari interval $[a,b]$ adalah himpunan berhingga dari subhimpunan $[a,b]$ sehingga $P = \{x_0, x_1, x_2, \ldots, x_n\} \subset [a,b]$ dengan $a = x_0 < x_1 < \ldots < x_n = b$.

Pada integral Riemann dikenal **jumlahan Riemann** fungsi *f* atas partisi $P = \{x_0, x_1, \ldots, x_n\}$ pada $[a,b]$ dengan $a,b \in \mathbb{R}$, ditulis $S(P,f)$, yang didefinisikan sebagai

$$S(f,P) = \sum_{i=1}^{p} f(t_i)(x_i - x_{i-1})$$

dengan $t_i \in [x_{i-1}, x_i]$ sebarang dan $i = 1,2,3,\ldots,n$. Kemudian, ambil $\|P\| = \text{maks}\{x_i - x_{i-1} : i = 1,2,\ldots,n\}$ maka *integral Riemann f* pada $[a,b]$ didefinisikan sebagai

$$(R)\int_a^b f(x)dx = \lim_{P\to 0} S(P,f)$$

dengan syarat, nilai limit pada ruas kanan ada dan real. Jika didefinisikan *F* fungsi bernilai real dengan $F(x) = (R)\int_a^b f(x)dx$, maka *F* dikatakan sebagai fungsi primitif dari *f* pada interval $[a,b]$. Jika *f* kontinu, maka *F* adalah antiderivatif.

Jumlahan Riemann dapat ditinjau dari jumlahan Riemann bawah dan jumlahan Riemann atas yang kemudian dikembangkan oleh Frenchman G. Darboux (1842-1917) untuk mendefinisikan integral Darboux. Integral ini ekuivalen dengan integral Riemann. Misalkan $f:[a,b]\to\mathbb{R}$ adalah fungsi terbatas. Maka untuk setiap partisi $P=\{x_0,x_1,\ldots,x_n\}$ dari $[a,b]$ dapat didefinisikan *jumlahan Riemann bawah* sebagai berikut.

$$L(P,f) = \sum_{i=1}^{p} m_i(x_i - x_{i-1})$$

dengan $m_i = \inf_{x\in[x_i,x_{i-1}]} f(x)$. Selanjutnya, dapat didefinisikan pula *jumlahan Riemann atas* sebagai berikut.

$$U(P,f) = \sum_{i=1}^{p} M_i(x_i - x_{i-1})$$

dengan $M_i = \sup_{x\in[x_i,x_{i-1}]} f(x)$.

Jika dari jumlahan Riemann, *n* dibuat tak hingga banyaknya, maka akan diperoleh hampiran dari nilai integral *f* yang didefinisikan sebagai integral Riemann atas dan integral Riemann bawah sebagai $L(f)$ dan $U(f)$.

$$L(f) = \sup\{L(P,f) = \sum_{i=1}^{p} m_i(x_i - x_{i-1})\}$$

dan

$$U(f) = \inf\{U(P,f) = \sum_{i=1}^{p} M_i (x_i - x_{i-1})\}.$$

Dalam hal ini $L(f) \le U(f)$. Jika $L(f) = U(f)$ maka *f* dikatakan terintegralkan Riemann dan nilainya disebut sebagai integral Riemann yang dilambangkan dengan $\int_a^b f(x)dx$.

c. Integral Lebesgue

Misalkan (X, Σ) ruang terukur, yaitu *X* suatu himpunan dan Σ sebuah aljabar-σ pada *X*. Fungsi $\mu : \Sigma \to [0, \infty)$ dikatakan ukuran jika memenuhi sifat-sifat: $\mu(A) \ge 0$ untuk semua $A \in \Sigma, \mu(A) = 0,$ dan $\mu\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} \mu(A_i)$ untuk semua $A_1, A_2, \ldots \in \Sigma$ yang saling lepas (yaitu $A_i \cap A_j = \varnothing$ untuk semua $i \ne j$). Anggota dari Σ dikatakan himpunan terukur dan (X, Σ, μ) disebut ruang ukuran.

Selanjutnya, misalkan *A* adalah subhimpunan dari bilangan real dan $\{I_k\}_{k=1}^{\infty}$ menyatakan koleksi terhitung dari interval buka tak kosong dan terbatas yang menyelimuti *A*. Ukuran luar dari *A*, $m^*(A)$, didefinisikan sebagai

$$m^*(A) = \inf\left\{\sum_{k=1}^{\infty} l(I_k) \middle| A \subseteq \bigcup_{k-1}^{\infty} I_k\right\}.$$

Maka misalkan *E* adalah himpunan terukur, ukuran Lebesgue, dinotasikan dengan $m(E)$, didefinisikan sebagai

$$m(E) = m^*(E).$$

Selanjutnya, misalkan *f* adalah fungsi terbatas (bernilai real) yang terdefinisi pada sebuah himpunan terukur hingga *E*. Dengan menganalogikan integral Riemann, definisikan integral atas dan integral bawah dari integral Lebesgue sebagai berikut.

$$\sup\left\{\int_E \varphi \,\middle|\, \varphi \text{ fungsi sederhana dan } \varphi \le f \text{ pada } E\right\}$$

dan

$$\inf\left\{\int_E \phi \,\middle|\, \phi \text{ fungsi sederhana dan } \varphi \le f \text{ pada } E\right\}.$$

Karena *f* diasumsikan terbatas, dengan menggunakan sifat kemonotonan integral untuk fungsi sederhana, integral atas dan bawah tersebut juga berhingga dan integral atas selalu lebih besar dari integral bawah.

Definisi 2 Sebuah fungsi terbatas *f* pada domain *E* yang memiliki ukuran hingga dikatakan terintegralkan Lebesgue atas *E* apabila integral Lebesgue atas dan bawah dari *E* bernilai sama. Nilai dari integral dinamakan integral Lebesgue atau integral *f* atas *E* dan dinotasikan sebagai $\int_E f$ (Royden dan Fitzpatrick, 2015).

Ada beberapa fungsi yang terintegralkan Lebesgue namun tidak terintegralkan Riemann. Sebagai contoh, himpunan bilangan rasional *E* pada [0,1] yang merupakan sebuah himpunan terukur dengan ukuran nol. Fungsi Dirichlet f adalah pembatasan fungsi karakteristik dari E pada [0,1], tulis sebagai χ_E. Maka f terintegralkan pada [0,1] dan

$$\int_{[0,1]} f = \int_{[0,1]} 1.\chi_E = 1.m(E) = 0$$

tetapi fungsi tersebut tidak terintegralkan Riemann pada [0,1].

Integral Lebesgue dapat dikatakan sebagai integral mutlak, artinya, apabila suatu fungsi *f* terintegralkan (Lebesgue) pada [a,b] maka $|f|$ juga terintegralkan (Lebesgue) pada [a,b].

d. Integral Henstock-Kurzweil

Sebelum membahas integral Henstock-Kurzweil, diperkenalkan terlebih dahulu beberapa istilah berikut.

i. Sebuah fungsi $\delta:[a,b]\to\mathbb{R}^+$ dikenal sebagai *gauge* pada $[a,b]$.

ii. Misalkan δ menyatakan suatu *gauge* pada $[a,b]$. Partisi $\{(t_1,[u_1,v_1]),\ldots,(t_p,[u_p,v_p])$ pada $[a,b]$ dikatakan $\delta-fine$ jika $[u_k,v_k]\subset(t_k-\delta(t_k),t_k+\delta(t_k))$ untuk $k=1,\ldots,p$.

Pernyataan di atas belum menjamin bahwa sebarang *gauge* pada [*a,b*], memiliki partisi $\delta-fine$. Perhatikan contoh berikut.

Contoh 1. Definisikan *gauge* δ pada $[a,b]$ sebagai

$$\delta(t)=\begin{cases} t & \text{jika } 0<t\le 1 \\ \dfrac{1}{2} & \text{jika } t=0. \end{cases}$$

Dengan demikian $\left\{\left(0,\left[0,\frac{1}{3}\right]\right),\left(\frac{1}{2},\left[\frac{1}{3},\frac{1}{2}\right]\right),\left(1,\left[\frac{1}{2},1\right]\right)\right\}$ adalah partisi $\delta-fine$ dari [0,1] tetapi $\left\{\left(0,\left[0,\frac{1}{3}\right]\right),\left(\frac{1}{2},\left[\frac{1}{3},\frac{1}{2}\right]\right),\left(\frac{1}{2},\left[\frac{1}{2},1\right]\right)\right\}$ bukan merupakan partisi $\delta-fine$ dari [0,1].

Dari Contoh 1., partisi $\delta-fine$ dapat dipilih pada gauge δ, walaupun ada pula partisi yang dapat dibentuk namun bukan merupakan partisi $\delta-fine$. Hal ini menunjukkan eksistensi $\delta-fine$ pada suatu *gauge*. Terkait hal tersebut, Lemma 1 menyebutkan mengenai eksistensi $\delta-fine$ dari suatu interval tertutup dan terbatas.

Lemma 1 (Lee, 2011; Herlinawati, 2021). Jika δ adalah sebuah *gauge* pada [*a,b*] maka ada setidaknya satu partisi $\delta-fine$ dari [*a,b*].

Selanjutnya, misalkan $P=\{(t_1,[u_1,v_1]),\ldots,(t_p,[u_p,v_p])$ partisi pada $[a,b]$ dan *f* fungsi real yang terdefinisi pada $\{t_1,\ldots,t_p\}$ maka

$$S(f,P)=\sum_{i=1}^{p} f(t_i)(v_i-u_i)$$

dengan $S(f,P)$ merupakan jumlahan Henstock-Kurzweil fungsi f atas partisi P pada interval $[a,b]$. Jika *p* dibuat mendekati tak hingga, maka nilai $S(f,P)$ akan mendekati nilai integralnya. Integral Henstock-Kurzweil ini dibangun berdasarkan partisi $\delta-fine$ yang didefinisikan dengan memodifikasi konstanta positif δ pada integral Riemann menjadi fungsi positif δ. Eksistensi dari partisi $\delta-fine$ pada $[a,b]$ dijamin oleh Lemma 1. Secara eksplisit, fungsi *f* tersebut adalah fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil.

Fungsi-fungsi yang dikatakan terintegralkan Henstock-Kurzweil pada $[a,b]$ adalah fungsi-fungsi yang memenuhi kondisi: jika ada bilangan real *A*, dengan sifat untuk setiap bilangan positif ε terdapat fungsi positif δ pada $[a,b]$ dengan sifat partisi $\delta-fine$ $\{([u_i,v_j];x_i):i=1,2,3,\ldots,p\}$ pada $[a,b]$, berlaku

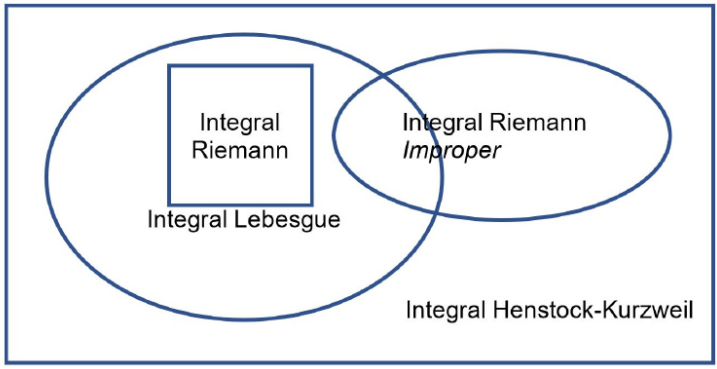
$$|A-S(f,P)|<\varepsilon.$$

Integral Henstock-Kurzweil juga dapat dikatakan sebagai generalisasi dari integral Riemann. Koleksi dari semua fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil pada $[a,b]$ dinotasikan sebagai $HK([a,b])$ dan ruang fungsi yang memuat semua fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil dikenal sebagai ruang Henstock-Kurzweil.

Perkembangan teori ini terus berlanjut antara lain tentang sifat-sifat pada fungsi-fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil, kekonvergenan, pelengkap dari ruang Hentsock-Kurzweil, ekuivalensi antara integral Denjoy, Peron, dan Henstock-Kurzweil, integral nonlinear, topologi, kolaborasi dengan konsep lainnya seperti ruang Henstock-Orlicz, ruang Distribusi Hentsock-Kurzweil, dan lainnya, serta aplikasinya pada bidang lainnya seperti analisis harmonik, statistika, dan keuangan.

e. Hubungan antar Integral Riemann, Lebesgue, dan Henstock-Kurzweil

Integral Hentock-Kurzweil lebih umum dan lebih banyak mengintegralkan fungsi daripada integral Riemann dan integral Lebesgue. Jika digambarkan dalam bentuk diagram Venn, maka akan terlihat seperti Gambar 2 berikut.



Sumber: Khan, 2019

Gambar 2. Hubungan Antar Integral

2. Penerapan Integral Henstock-Kurzweil dalam Berbagai Masalah Persamaan Diferensial

Beberapa fungsi dengan karakteristik khusus seperti fungsi-fungsi yang berosilasi sangat tinggi di dekat singularitasnya mengakibatkan fungsi tersebut tidak terintegralkan Lebesgue, namun fungsi tersebut dapat diselesaikan dengan menggunakan konsep integral Henstock-Kurzweil. Masalah persamaan diferensial juga dimungkinkan mengandung fungsi-fungsi tersebut misalnya masalah persamaan diferensial (eliptik), persamaan Schrödinger, dan persamaan diferensial Sturm-Liouville.

a. Solusi Numerik dari Persamaan Diferensial dengan Fungsi Terintegralkan Henstock-Kurzweil

Masalah persamaan diferensial dapat diselesaikan baik secara analitik maupun numerik. Fokus pembahasan bagian ini

adalah penyelesaian numerik dari persamaan diferensial yang mengandung fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil. Lebih khusus lagi yaitu tentang penggunaan metode elemen hingga pada persamaan diferensial parsial eliptik. Pada umumnya, bagi fungsi-fungsi yang mempunyai osilasi sangat tinggi digunakan metode Trapezoid atau Simpson untuk menghitung nilai integral secara numerik. Namun, ketika fungsi tersebut berosilasi di sekitar titik singularnya kedua metode ini kurang akurat. Bahkan untuk kasus persamaan diferensial yang mengandung fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil, metode ini dapat mengalami kegagalan dalam proses perhitungannya (Leon-Velasco et al., 2019). Untuk mengatasi hal tersebut, akan ditinjau penggunaan metode kuadratur untuk menghitung integral dari fungsi-fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil dan galat relatif yang dihasilkan dari metode tersebut.

Pada artikel ini, metode kuadratur yang digunakan adalah metode kuadratur terbuka, kuadratur tertutup, dan kuadratur Gauss-Lobatto. Ketiga metode ini diterapkan untuk menghitung secara numerik integral fungsi Henstock-Kurzweil di ruang berdimensi-1. Misalkan $[a,b]$ interval tertutup dan terbatas, $n \in \mathbb{N}$, $k \in \mathbb{R}$, dan $f \in HK([a,b])$. Notasi, terminologi, maupun formula dalam bagian ini mengacu pada Leon-Velasco et al. (2019).

Pertama, kuadratur terbuka dari *f*, dinotasikan sebagai $Q_n^1(f)$, dituliskan dalam bentuk formula berikut.

$$Q_n^1(f) = \frac{b-a}{n(n+1)} \sum_{k=2}^{n} k\left[f(u_{n,k-1}) + f(u_{n,k})\right].$$

Persamaan ini digunakan untuk fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil yang mempunyai singularitas di $x = a$ pada interval [a,b] dengan

$$u_{n,k} = a + \frac{k(k+1)}{n(n+1)}(b-a).$$

Kedua, pendekatan kuadratur tertutup dari *f*, dinotasikan sebagai $Q_n^2(f)$, dapat dihitung dengan menggunakan formula

$$Q_n^2(f)=\frac{b-a}{n(n+1)}\left\{\left[f(u_{n,0})+f(u_{n,1})\right]\sum_{k=2}^{n}k\left[f(u_{n,k-1})+f(u_{n,k})\right]\right\}.$$

Kuadratur ini digunakan untuk menyelesaikan integral pada $[a,b]$ dengan

$$u_{n,k}=a+\frac{k(k+1)}{n(n+1)}(b-a).$$

Ketiga, kuadratur Gauss-Lobatto dituliskan sebagai berikut

$$\int_{-1}^{1}f(x)dx\simeq\sum_{k=1}^{n}w_i f(x_i)+pf(-1)+qf(1)$$

dengan polinomial paling banyak derajat $2n+1$, dan x_i menyatakan titik, w_i menyatakan bobot, serta variabel p dan q dapat ditentukan dengan metode koefisien tak tentu.

Selanjutnya, untuk melihat keakuratan penyelesaian dari suatu masalah persamaan diferensial, digunakan galat relatif pada setiap metode dengan rumus

$$Er(u,u_h)=\frac{\left\|u(x)-u_h(x)\right\|_{L_2(\Omega)}}{\left\|u(x)\right\|_{L_2(\Omega)}}.$$

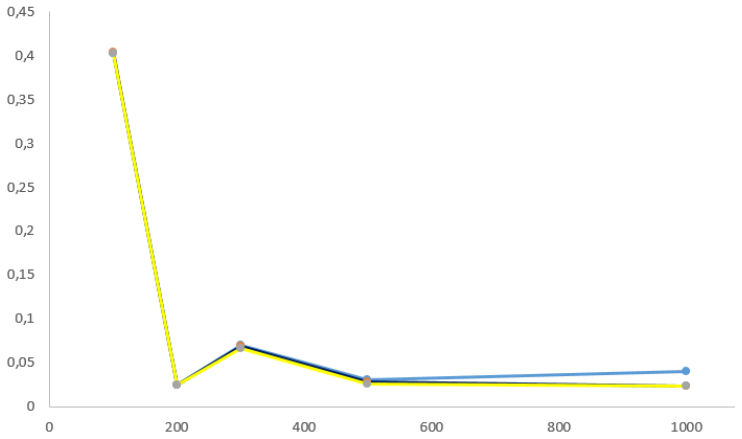
Sebagai ilustrasi, diberikan Contoh 2. menggunakan ketiga metode tersebut dengan memperhatikan galat relatif yang dihasilkan.

Contoh 2. Diberikan masalah persamaan diferensial eliptik berikut.

$$-\frac{d}{dx}\left(a(x)\frac{du(x)}{dx}\right)=f,\ 0<x<1$$
$$u(0)=0=u(1).$$

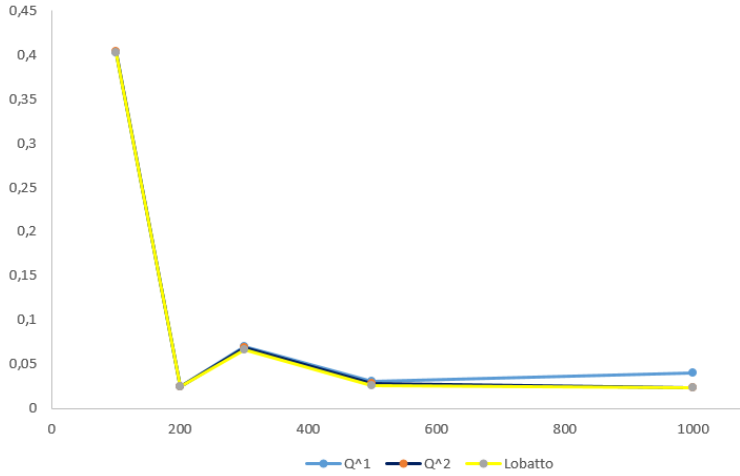
dengan domain A(0,1). Kemudian, diberikan *h* = 0,0501 sebagai parameter diskrit $a(x)=\sin(m\pi x)$, sebagai parameter difusi, dan $f(x)=6x\sin(m\pi x)-(1-3x^2)m\pi\cos(m\pi x)$ dengan $m\geq 1$ dan $m\in\mathbb{N}$. Adapun solusi eksak dari persamaan diferensial tersebut adalah $u(x)=x(1-x^2)$. Untuk melakukan perhitungan secara numerik, diskritisasi domain *A* sebanyak 200 titik dengan 199 elemen/area. Pendiskritisasian dapat diperbanyak untuk memperoleh presisi yang lebih tinggi. Dalam hal ini akan dilihat pula galat relatif jika dilakukan diskritisasi sebanyak 400 titik dengan 399 elemen. Maka dengan menggunakan metode kuadratur terbuka, kuadratur tertutup, dan kuadratur Gauss-Lobatto, diperoleh hasil eror relatif pada Gambar 3. Jika *nodes* atau titik diperbanyak, maka diperoleh nilai eror relatif dari masing-masing metode yang disajikan pada Gambar 4.

Dari Gambar 3. dan Gambar 4., dapat disimpulkan bahwa untuk *m* yang semakin besar, dan jumlah yang didiskritisasi titik yang semakin banyak, ketiga metode tersebut menghasilkan galat relatif yang tidak jauh berbeda, namun metode kuadratur tertutup dan Gauss-Lobatto cenderung memiliki galat relatif yang hampir sama dibandingkan metode kuadratur terbuka.



Sumber: Leon-Velasco et al., 2019

Gambar 3. Galat Relatif untuk Diskritisasi 200 Titik



Sumber: Leon-Velasco et al., 2019

Gambar 4. Galat Relatif untuk Diskritisasi 400

Dengan demikian, metode elemen berhingga baik menggunakan kuadratur terbuka, kuadratur tertutup, maupun kuadratur Gauss-Lobatto, dapat digunakan sebagai metode untuk menghitung solusi numerik dari persamaan diferensial yang memuat fungsi-fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil.

b. Masalah Persamaan Schrödinger

Persamaan Schrödinger, berupa persamaan diferensial, digunakan untuk memodelkan pergerakan gelombang. Pada mekanika kuantum, persamaan ini menjelaskan perubahan dari suatu sistem fisika/sistem kuantum (dapat berupa atom, molekul, dan partikel sub-atomik) tiap waktu yang membuat efek kuantum seperti dualitas gelombang-partikel menjadi siginifikan. Persamaan ini dikemukakan oleh Erwin R.J.A Schrödinger (1887-1961), seorang fisikawan Austria. Pada bagian ini, dijelaskan tentang eksistensi solusi dari persamaan Schrödinger (operator Schrödinger) yang mengandung fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil.

Jika q fungsi bernilai real pada $[a,b]$ maka operator Schrödinger L didefinisikan sebagai

$$Ly \equiv -y'' + qy. \tag{1}$$

Persamaan diferensial $Ly = f$ menunjukkan persamaan diferensial linear orde dua. Solusi umum dari persamaan diferensial linear orde dua adalah $y = c_1 y_1(x) + c_2 y_2(x)$ dengan $y_1(x)$ dan $y_2(x)$ harus bebas linear. Untuk menentukan kebebasan linear dari himpunan fungsi $\{y_1(x), y_2(x)\}$ digunakan determinan Wronski

$$W(y_1, y_2) = \begin{vmatrix} y_1(x) & y_2(x) \\ y_1'(x) & y_2'(x) \end{vmatrix} \neq 0.$$

Jika solusi dari persamaan (1) adalah $y = c_1 y_1(x) + c_2 y_2(x)$ dengan $y_1, y_2 \in C^1([a,b])$ dan $x \in [a,b]$, maka nilai determinan Wronski berupa

$$W_x(y_1, y_2) = y_1(x) y_2'(x) - y_2(x) y_1'(x).$$

Jika $W_x(y_1, y_2) \neq 0$ untuk suatu $x = c \in [a,b]$ maka y_1, y_2 bebas linear. Selanjutnya, misalkan

$$\mathcal{A} = \{y \in AC([a,b]) : y' \in ACG^*([a,b])\}$$

dengan $AC([a,b])$ menyatakan ruang fungsi kontinu mutlak pada $[a,b]$, dan $ACG^*([a,b])$ adalah perumuman dari ruang fungsi kontinu mutlak pada $[a,b]$. Definisikan pula

$$\mathcal{A}^* = \{y \in \mathcal{A} : Ly = 0 \text{ hampir dimana-mana pada } [a,b]\}$$

maka $y_1(x) y_2'(x) - y_2(x) y_1'(x) \in ACG^*([a,b])$. Eksistensi turunan dari $y \in \mathcal{A}$ $y \in \mathcal{A}$ dengan menggunakan integral Henstock-Kurzweil diberikan pada Lemma 2.

Lemma 2 (Sánchez-Perales dan Mendoza-Torres, 2020) Jika $y \in \mathcal{A}$ maka y' ada dan kontinu pada $[a,b]$, $|y'|$, terintegralkan, y fungsi variasi terbatas, y'' ada hampir dimana-mana, dan $\int_a^x y'' = y'(x) - y'(a)$ untuk setiap $x \in [a,b]$ dengan integralnya merupakan integral Henstock-Kurzweil.

Dalam hal ini masalah persamaan Schrödinger meliputi masalah nilai awal dan nilai batas. Adapun dalam pembahasan difokuskan pada eksistensi dari solusi kedua masalah tersebut yaitu pada persamaan Schrödinger yang mengandung fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil.

Pertama, eksistensi solusi masalah nilai awal persamaan Schrödinger dijamin oleh Teorema 1 berikut.

Teorema 1 (Sánchez-Perales, 2017). Misalkan $c \in [a,b], \lambda, \alpha, \beta \in \mathbb{R}$. Jika $g \in HK([a,b])$ maka masalah nilai awal sebagai berikut.

$$(L - \lambda)y = g \text{ hampir dimana-mana}$$
$$y(c) = \alpha$$
$$y'(c) = \beta$$

memiliki solusi tunggal $f \in ACG^*([a,b])$ dan $f' \in ACG^*([a,b])$. Selanjutnya, masalah nilai batas pada persamaan Schrödinger diberikan sebagai berikut.

$$\begin{cases} L_y = f \\ m_1 y(a) + n_1 y'(a) + p_1 y(b) + q_1 y'(b) = h_1 \\ m_2 y(a) + n_2 y'(a) + p_2 y(b) + q_2 y'(b) = h_2 \end{cases}$$

dengan $m_i, n_i, p_i, q_i, h_i \in \mathbb{R}$, serta q dan f fungsi-fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil pada $[a,b]$. Persamaan tersebut dapat ditulis kembali sebagai $U_y = h$ dengan

$$U_y = \begin{pmatrix} m_1 & n_1 & p_1 & q_1 \\ m_2 & n_2 & p_2 & q_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y(a) \\ y'(a) \\ y(b) \\ y'(b) \end{pmatrix} \text{ dan } h = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix}$$

maka *U* merupakan operator linear. Adapun eksistensi dari solusi masalah nilai batas diberikan dalam teorema-teorema berikut.

Teorema 2 Misalkan $h \in \mathbb{R}^2$ dan $f \in HK([a,b])$. Misalkan masalah

$$\begin{cases} L_y = f \text{ hampir dimana-mana,} \\ U(y) = h, \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} L_y = 0 \text{ hampir dimana-mana,} \\ U(y) = 0, \end{cases} \tag{3}$$

maka (2) mempunyai solusi tunggal di $\mathcal{A}$ atau (3) mempunyai solusi tidak nol di $\mathcal{A}$ (Sánchez-Perales dan Mendoza-Torres, 2020).

Bukti. Misalkan $\{y_1, y_2\}$ basis dari $\mathcal{A}$.

Kasus 1: Jika $\{Uy_1, Uy_2\}$ himpunan tidak bebas linear, maka misalkan $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ sehingga $(\alpha, \beta) \neq (0,0)$ dan $\alpha Uy_1 + \beta Uy_2 = 0$. Maka $\alpha y_1 + \beta y_2 \in \mathcal{A}^*$, $\alpha y_1 + \beta y_2 \neq 0$, dan $U(\alpha y_1 + \beta y_2) = 0$. Dengan demikian, $\alpha y_1 + \beta y_2$ merupakan solusi tak nol dari (3).

Jika $y = c_1 y_1(x) + c_2 y_2(x) \in \mathcal{A}$ dengan $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$ adalah solusi dari (i) dan $z = y + \alpha y_1 + \beta y_2$, maka $z \in \mathcal{A}$ juga merupakan solusi dari masalah (2) dan $z \neq y$.

Kasus 2: Jika $\{Uy_1, Uy_2\}$ himpunan bebas linear, $\det(Uy_1, Uy_2) \neq 0$. Pilih $\tilde{y} \in \mathcal{A}$ sedemikian sehingga $L\tilde{y} = f$ hampir dimana-mana pada $[a,b]$. Karena $\det(Uy_1, Uy_2) \neq 0$, maka ada $\alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}$ sehingga $h - U\tilde{y} = \alpha_1 Uy_1 + \alpha_2 Uy_2 \Leftrightarrow h = U\tilde{y} + \alpha_1 Uy_1 + \alpha_2 Uy_2$. Jadi,

$y = \tilde{y} + a_1 y_1 + a_2 y_2$ solusi dari (2). Jika ada solusi lain dari (2), sebut $p \in \mathcal{A}$, maka $\tilde{y} - p \in \mathcal{A}^*$ sehingga terdapat $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ sedemikian sehingga $p - \tilde{y} = \alpha y_1 + \alpha y_2$. Hal ini mengakibatkan $h - U\tilde{y} = \alpha U y_1 + \beta U y_2$. Dengan demikian $\alpha = a_1$ dan $\beta = a_2$. Jadi, $p = y$. Hal ini menunjukkan ketunggalan solusi dari (2). Selanjutnya, jika $z \in \mathcal{A}$ solusi dari (3) maka terdapat $b_1, b_2 \in \mathbb{R}$ sehingga $z = b_1 y_1 + b_2 y_2$ dan $b_1 U y_1 + b_2 U y_2 = 0$. Dengan demikian, $b_1 = b_2 = 0$. Jadi, $z = 0$. ■

Dari Teorema 2, apabila masalah (3) hanya mempunyai solusi trivial di $\mathcal{A}$ dan $\{y_1, y_2\}$ adalah basis dari $\mathcal{A}$, maka diperoleh bahwa $\det(Uy_1, Uy_2) \neq 0$. Oleh karena itu, terdapat $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ sehingga $\alpha U y_1 + \beta U y_2 = h$. Dengan demikian, jika *y* adalah solusi dari masalah (2) dengan $h = 0$, maka $y + \alpha y_1 + \beta y_2$ adalah solusi tunggal dari masalah (2).

Teorema 3 Misalkan $\{y_1, y_2\}$ adalah basis dari $\mathcal{A}$, dengan $W(y_1, y_2) = 1$, dan $K : [a,b] \times [a,b] \to \mathbb{R}$ didefinisikan sebagai berikut.

$$K(x,t) = \begin{cases} 0, & \alpha \le x < t \\ y_2(t) y_1(x) - y_1(t) y_2(x), & t \le x < b. \end{cases}$$

Jika masalah (3) hanya mempunyai solusi trivial dan $f \in HK([a,b])$ maka

$$y(x) = \int_a^b \left[K(x,t) + c_1(t) y_1(x) + c_2(t) y_2(x) \right] f(t)\, dt$$

dengan

$$c_1(t)=\frac{\det\left(\left((y_1(t)y_2(b)-y_2(t)y_1(b)\right)\begin{bmatrix}p_1\\p_2\end{bmatrix}+\left(y_1(t)y_2'(b)-y_2(t)y_1'(b)\right)\begin{bmatrix}q_1\\q_2\end{bmatrix},Uy_2\right)}{\det\left(Uy_1,Uy_2\right)}$$

dan

$$c_2(t)=\frac{\det\left(Uy_1,\left(\left(y_1(t)y_2(b)-y_2(t)y_1(b)\right)\begin{bmatrix}p_1\\p_2\end{bmatrix}+\left(y_1(t)y_2'(b)-y_2(t)y_1'(b)\right)\begin{bmatrix}q_1\\q_2\end{bmatrix}\right)}{\det\left(Uy_1,Uy_2\right)}$$

untuk semua $t\in[a,b]$, merupakan solusi tunggal dari

$$\begin{cases}L_y=f \text{ hampir dimana-mana,}\\ U(y)=0.\end{cases}$$

(Sánchez-Perales et al., 2020).

Lemma 3 Misalkan y_1,y_2,K,c_1,c_2 seperti pada Teorema 3. Misalkan pula $G(x,t)=K(x,t)+c_1(t)y_1(x)+c_2(t)y_2(x)$ dan $\mathcal{D}=\{y\in\mathcal{A}:Uy=0\}$. Maka $L:\mathcal{D}\to HK([a,b])$ invertibel dan inversnya adalah $\Gamma:HK([a,b])\to\mathcal{D}$ dengan $\Gamma(f)=\int_a^b G(x,t)f(t)dt$ (Sánchez-Perales et al., 2020).

Teorema 4 Jika L operator simetrik maka Γ juga simetrik. Misalkan pula (β_n) dan (ω_n) sedemikian sehingga $L\omega_n=\beta_n\omega_n$ untuk setiap $n\in\mathbb{N}$. Jika terdapat $M>0$ sedemikian sehingga $|\omega_n(x)|\le M$ untuk semua $n\in\mathbb{N}$ dan $x\in[a,b]$, dan $\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{|\beta_k|}<\infty$ maka untuk setiap $f\in HK([a,b])$

$$\Gamma(f)=\sum_{k=1}^{\infty}\langle f,\omega_k\rangle\frac{1}{\beta_k}\omega_k$$

(Sánchez-Perales et al., 2020).

Bukti. Ambil sebarang $f \in HK([a,b])$ maka terdapat barisan $(s_n) \in L([a,b])$ sedemikian sehingga $\|s_n - f\| \to 0$. Hal ini mengakibatkan

$$\left|\left\|\langle s_n, \omega_k \rangle\right| - \left|\langle f_n, \omega_k \rangle\right|\right| \le \left|\langle s_n - f_n, \omega_k \rangle\right| \le \|s_n - f\| \|\omega_k\| \to 0.$$

Jadi, $\left|\langle f_n, \omega_k \rangle\right| = \lim_{n\to\infty} \left|\langle s_{n_n}, \omega_k \rangle\right|$. Kemudian, misalkan $\|f\| > 0$ maka terdapat $N \in \mathbb{N}$ sehingga $\|s_n\| \le 2\|f\|$ untuk setiap $n \in \mathbb{N}$.

Maka $\left|\langle s_n, \omega_k \rangle\right| \le \int_a^b |s_n(t)| |\omega_k(t)| dt \le M\|s_n\| \le 2M\|f\|$ untuk setiap $k \in \mathbb{N}$ dan $n \ge N$.

Akibatnya, $\left|\langle f_n, \omega_k \rangle\right| \le 2M\|f\|$ dan $\left|\sum_{k=1}^{n} \langle f, \omega_k \rangle \frac{1}{\beta_k} \omega_k(x)\right| \le 2M^2 \|f\| \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{|\beta_k|}$.

Karena $L^2([a,b])$ padat di $HK([a,b])$ dengan norm Alexiewiecz, maka terdapat barisan (f_p) di $I^2([a,b])$ sedemikian sehingga $\|f_p - f\| \to 0$. Kemudian, diberikan operator $\Gamma : (HK([a,b]), \|.\|) \to (C([a,b]), \|.\|_\infty)$ terbatas, maka terdapat subbarisan $(f_{pm}) \subseteq (f_p)$, dan $\left|\Gamma(f_{pm})(x) - \Gamma(f)(x)\right| < \frac{\varepsilon}{3}$ untuk semua $x \in [a,b]$ dan $\|f_{pm} - f\| < \frac{\varepsilon}{3M}$.

Selanjutnya, karena (ω_n) konvergen di $L^2([a,b])$ maka terdapat $N \in \mathbb{N}$ sedemikian sehingga untuk setiap $n \ge N$ berlaku

$$\left\| f_{pm} - \sum_{k=1}^{\infty} \langle f_{pm}, \omega_k \rangle \omega_k \right\| < \frac{\varepsilon}{3 \text{maks}_{x\in[a,b]} \|G(x,.)\|_2}$$

Untuk setiap $n \in \mathbb{N}$ dan $x \in [a,b]$,

$$\begin{aligned}\left|\Gamma(f)(x) - \sum_{k=1}^{\infty} f, \omega_k \frac{1}{\beta_k} \omega_k(x)\right| \le & \left|\Gamma(f)(x) - \Gamma(f_{pm})(x)\right| \\ & + \left|\Gamma(f_{pm})(x) - \sum_{k=1}^{\infty} f_{pm}, \omega_k \frac{1}{\beta_k} \omega_k(x)\right| \\ & + \left|\sum_{k=1}^{\infty} f_{pm} - f, \omega_k \frac{1}{\beta_k} \omega_k(x)\right| \le \frac{\varepsilon}{3} \\ & + G(x,.)_2 f_{pm} - \sum_{k=1}^{\infty} f_{pm}, \omega_k \frac{1}{\beta_k} \omega_{k2} + M f_{pm} - f < \varepsilon.\end{aligned}$$

Dengan demikian, $\Gamma(f)=\sum_{k=1}^{\infty}\langle f,\omega_k\rangle\frac{1}{\beta_k}\omega_k$. ■

Contoh 3. Misalkan fungsi *f* didefinisikan pada interval [0,1] dengan

$$f(x)=\begin{cases}\frac{4\pi}{x}\sin\left(\frac{\pi}{x^2}\right), & x\in(0,1]\\ 0, & x=0\end{cases}.$$

Maka fungsi *f* merupakan fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil pada [0,1]. Kemudian diberikan masalah nilai batas sebagai berikut.

$$f(x)=\begin{cases}-y''+y=f \quad \text{hampir dimana}-\text{mana}\\ y(0)=0\\ y(1)=1.\end{cases}$$

Berdasarkan Teorema 2, masalah di atas mempunyai solusi tunggal. Kemudian berdasarkan Teorema 3, solusi tersebut adalah

$$y(t)=\Gamma(f)(t)-\left(e-e^{-1}\right)e^{-t}+\left(e-e^{-1}\right)e^{t}.$$

Selanjutnya berdasarkan Teorema 4, diperoleh

$$y(t)=\sum_{k=1}^{\infty}\langle f,\varphi_k\rangle\frac{1}{\mu_k}\varphi_k(t)-\left(e-e^{-1}\right)e^{-t}+\left(e-e^{-1}\right)e^{t}.$$

dengan $\varphi_k(x)=\sqrt{2}\,\sin(2\pi x)$ dan $\mu_k=1+k^2\pi^2$ dan $\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{\mu_k}<\infty$.

c. Persamaan Sturm-Liouville

Persamaan diferensial Sturm-Liouville merupakan persamaan diferensial orde dua dengan koefisien fungsi bernilai real dan kontinu pada interval tertutup serta memiliki suatu parameter dan nilai-nilai batas. Persamaan Sturm-Liouville banyak digunakan untuk memodelkan fenomena-fenomena yang ada di bidang fisika seperti persamaan panas, masalah getaran, penerapan elektroensefalogi, dan masalah lainnya. Contoh penerapan persamaan Sturm-Liouville adalah *heat*

exchanger yang banyak digunakan dalam industri minyak dan gas alam, pabrik kimia, refrigerasi, dan pembangkit listrik, sedangkan contoh sederhana yang dapat ditemukan dalam kehidupan sehari-hari adalah pada radiator mobil dan alat sterilisasi.

Persamaan Sturm-Liouville juga memiliki peran yang relevan dalam mekanika kuantum. Beberapa masalah tersebut dapat dirumuskan dalam interval tak terbatas. Terkadang masalah mekanika kuantum dijelaskan oleh persamaan diferensial dengan koefisien osilasi yang tinggi. Karakteristik khusus dari koefisien tersebut adalah tidak terintegralkan Lebesgue. Alternatif untuk menyelesaikan integral dengan fungsi osilasi tinggi adalah dengan menggunakan integral Henstock-Kurzweil.

Pada artikel ini, persamaan Sturm-Liouville yang digunakan adalah

$$-\left[\rho \dot{u}\right] + qu = f \quad \text{hampir di mana-mana pada} \quad \left[a,\infty\right)$$

dengan kondisi nilai batas $u(a) = u(a+) = 0, u(\infty) = u(\infty -) = 0,$ dimana turunannya merupakan turunan tipe lemah, *q* fungsi terintegralkan Lebesgue, *f* fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil, ρ fungsi variasi terbatas pada interval kompak $I \subseteq \left[a,\infty\right)$, $1/\rho$, terintegralkan Lebesgue, dan ACG^* pada $\left[a,\infty\right)$. Selanjutnya, penentuan nilai parameter pada Persamaan Sturm-Liouville erat kaitannya dengan masalah nilai eigen. Hal ini dapat diselesaikan dengan metode analitik dan metode numerik. Solusi numerik dapat diperoleh dengan menggunakan metode elemen hingga ketika fungsi tersebut kontinu.

Persamaan Sturm-Liouville pada interval terbatas

Misalkan $W_{HK}^2\left(\left[a,b\right]\right)$ adalah ruang fungsi dari $u \in W_{HK}\left(\left[a,b\right]\right)$ sedemikian sehingga $\dot{u} \in W_{HK}\left(\left[a,b\right]\right)$, dan $\Omega_0\left(\left[a,b\right]\right)$ adalah ruang fungsi dari $u \in W_{HK}\left(\left[a,b\right]\right)$ sedemikian sehingga $\dot{u} \in L^\infty\left(\left[a,b\right]\right), u(a) = u(a+) = 0$ dan $u(b) = u(b-) = 0$. Eksistensi dari solusi persamaan Sturm-Liouville pada interval terbatas dikemukakan Sánchez-Perales et al. (2021) dalam teorema-teorema berikut.

Teorema 5 Misalkan $f \in HK([a,b]), q \in L^1([a,b])$, dan $\rho \in BV([a,b])$ sehingga $1\backslash\rho \in ACG^*([a,b])$ maka

i. masalah nilai batas

$$\begin{cases} -[\rho u]' + qu = f \text{ hampir di mana-mana pada } [a,\infty) \\ u(a) = u(a+) = 0, u(\infty) = u(\infty-) = 0 \end{cases}$$

mempunyai solusi tunggal di $W^2_{HK}([a,b])$.

ii. masalah variasi

$$\int_a^b p\dot{u}v' + \int_a^b quv = \int_a^b fv, \text{untuk semua } v \in \mathcal{V}_{[a,b]}$$

punya solusi tunggal di $\Omega_0([a,b])$

(Sánchez-Perales et al., 2021).

Teorema 6 Misalkan f, q, ρ seperti pada Teorema 5. Misalkan salah satu dari kedua pernyataan berikut terpenuhi:

i. fungsi ρ dan q positif

ii. fungsi nol adalah solusi tunggal dari masalah

$$\begin{cases} -[\rho u]' + qu = 0 \text{ hampir di mana-mana pada } (a,b) \\ u(a) = u(a+) = 0, u(b) = u(b-) = 0. \end{cases}$$

Maka

$$\begin{cases} -[\rho u]' + qu = f \text{ hampir di mana-mana pada } (a,b) \\ u(a) = u(a+) = 0, u(b) = u(b-) = 0 \end{cases}$$

mempunyai solusi tunggal $u \in W^2_{Hk}([a,b])$ dan terdapat $K > 0$ sehingga $\|u - \tilde{u}\|_w \le K\|f - \tilde{f}\|_A$ dengan $\tilde{f} \in HK([a,b])$ sebarang dan $\tilde{u}$ merupakan solusi dari masalah

$$\begin{cases} -[\rho u]' + qu = \tilde{f} \text{ hampir di mana-mana pada } (a,b) \\ u(a) = u(a+) = 0, u(b) = u(b-) = 0 \end{cases}$$

(Sánchez-Perales et al., 2021).

Persamaan Sturm-Liouville pada interval tak terbatas

Eksistensi solusi dari masalah Sturm-Liouville pada interval tak terbatas ekuivalen dengan masalah berikut; yaitu bagaimana menemukan $u \in \Omega_0\left(\left[a,\infty\right)\right)$ sehingga

$$\int_a^\infty p\dot{u}v' + \int_a^\infty quv = \int_a^\infty fv, \text{untuk semua } v \in \mathcal{V}_{\left[a,\infty\right)}.$$

Sánchez-Perales et al. (2021) menjelaskan eksistensi solusi tersebut melalui sifat operator $\Gamma : \left(\Omega_0\left(\left[a,\infty\right)\right), \|.\|_w\right) \to \left(\Omega_0\left(\left[a,\infty\right)\right), \|.\|_w\right)$, dan menghasilkan Teorema 7.

Teorema 7 (Sánchez-Perales et al., 2021). Misalkan $f \in HK\left(\left[a,\infty\right)\right), q, \rho \in L^1\left(\left[a,\infty\right)\right)$ sehingga $\rho \in BV\left(I\right)$ untuk setiap interval kompak $I \subseteq \left[a,\infty\right)$, dan $1 \setminus \rho \in ACG^*\left(\left[a,\infty\right)\right)$. Misalkan

i. fungsi ρ dan q positif

ii. fungsi nol adalah solusi tunggal dari masalah

$$\begin{cases} -\left[\rho\dot{u}\right] + qu = 0 \text{ hampir di mana-mana pada } \left(a,\infty\right) \\ u\left(a\right) = u\left(a+\right) = 0, u\left(\infty\right) = u\left(\infty-\right) = 0. \end{cases}$$

Jika salah satu dari kedua kondisi di atas terpenuhi, maka

$$\begin{cases} -\left[\rho\dot{u}\right] + qu = f \text{ hampir di mana-mana pada } \left(a,\infty\right) \\ u\left(a\right) = u\left(a+\right) = 0, u\left(\infty\right) = u\left(\infty-\right) = 0. \end{cases}$$

mempunyai solusi tunggal $u \in W_{Hk}^2\left(\left[a,\infty\right)\right)$ dan solusi tersebut bergantung secara kontinu pada data dari *f*.

KESIMPULAN

Berbagai inovasi dalam perkembangan teori integral ditunjukkan dengan kemunculan teori-teori baru sebagai penyempurnaan dari teori yang sudah ada. Adapun beberapa inovasi tersebut pada era teori integral modern antara lain: dimulai dengan ditemukannya konsep integral Newton, integral

Riemann dan integral Darboux, integral Lebesgue, hingga integral Henstock-Kurzweil. Integral Henstock-Kurzweil dapat mengintegralkan fungsi lebih banyak daripada konsep integral sebelumnya. Perkembangan integral Henstock-Kurzweil semakin luas dan dapat menjadi dasar penerapan teknologi dalam mendukung ketercapaian tujuan dari Masyarakat 5.0.

Penerapan integral Henstock-Kurzweil erat kaitannya dengan karakteristik fungsi yang digunakan di berbagai bidang, seperti fungsi-fungsi yang berosilasi sangat tinggi di dekat singularitasnya yang mengakibatkan fungsi tersebut tidak terintegralkan Lebesgue, namun fungsi tersebut dapat diselesaikan dengan menggunakan konsep integral Henstock-Kurzweil. Masalah persamaan diferensial juga dimungkinkan mengandung fungsi-fungsi tersebut misalnya masalah persamaan diferensial (eliptik), persamaan Schrödinger, dan persamaan diferensial Sturm-Liouville. Eksistensi solusi dari masalah persamaan Schrödinger dan Sturm-Liouville telah dibuktikan dengan memanfaatkan sifat dari operator Γ, sedangkan eksistensi solusi numerik dari persamaan diferensial eliptik dengan metode elemen hingga telah dilakukan dengan menggunakan metode kuadratur terbuka, kuadratur tertutup, dan kuadratur Gauss-Lobatto. Hasilnya adalah metode kuadratur tertutup dan Gauss-Lobatto cenderung memiliki galat relatif yang hampir sama dibandingkan metode kuadratur terbuka.

DAFTAR PUSTAKA

Borkowski, M. & Bugajewska, D. (2018). Applications of Henstock-Kurzweil integrals on an unbounded interval to differential and integral equations. *Mathematica Slovaca*, *68*(1), 77-88. https://doi.org/10.1515/ms-2017-0082.

Faruqi, U. A. (2019). Future service in Industry 5.0: survey paper. *Jurnal Sistem Cerdas*, *2*(1), 67 - 79. https://doi.org/10.37396/jsc.v2i1.21.

Federson, M., Mawhin, J., & Mesquita, C. (2021). Existence of periodic solutions and bifurcation points for generalized ordinary differential equations. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, *169*. https://doi.org/10.1016/j.bulsci.2021.102991.

Fukuyama, M. (2018). Society 5.0: Aiming for a new human-centered society. *Japan Spotlight 2018*, Special Article 2, July/August 2018.

Hazarika, B., & Kalita, H. (2021). Henstock-Orlicz space and its dense space. Asian-European Journal of Mathematics, *14*(7), 1-17. https://doi.org/10.1142/S179355712150114X.

Heikkilä, S.S. (2011). Differential and integral equations with Henstock-Kurzweil integrable functions. *Journal of Mathematical Analysis and Applications, 379*, 171-179. https://doi.org/10.1016/J.JMAA.2010.12.050.

Herlinawati, E. (2021). Beberapa sifat fungsi-fungsi terintegralkan Henstock-Kurzweil di ruang berdimensi-*n*. *JMPM: Jurnal Matematika dan Pendidikan Matematika, 6*(1)*, 81-89. https://doi.org/10.26594/jmpm.v6i1.2170.*

Herlinawati, E. (2022). Inclusion properties of Henstock-Orlicz spaces. *JTAM (Jurnal Teori dan Aplikasi Matematika), 6*(3), 724-730. https://doi.org/10.31764/jtam.v6i3.86181.

Indrati, C. H., (2017). Sekilas tentang integral Henstock-Kurzweil dan perkembangannya. Diakses dari https://repository.ugm.ac.id/274698/1/christiana_rini_indrati_opt.pdf.

Khan, M. Y. F. (2019). Beyond Riemann with Volterra, Henstock, and Kurzweil. *Reson 24***,** 477–489. https://doi.org/10.1007/s12045-019-0799-z.

Lee, P. Y. (1989), Lanzhou lectures on Henstock integration, World Scientific, Singapore.

Lee, P. Y. & Vyborny, R. (2000). *Integral : an aesy approach after Kurzwiel and Henstock*. United Kingdom: Cambridge University Press.

Lee, T. Y. (2011). *Henstock-Kurzweil integration on euclidean spaces*. World Scientific. https://doi.org/10.1142/7933.

Lee, T. Y. (2013). Two convergence theorems for Henstock-Kurzweil integrals and their applications to multiple trigonometric series. *Czech Math J 63*, 1–38. https://doi.org/10.1007/s10587-013-0001-9.

Leon-Velasco, D. A., Morin-Castillo, M. M., Oliveros-Oliveros, J. J., Perez-Becerra, T., Escamilla-Reyna., J. A., (2019). Numerical solution of some differential equations with Hentock-Kurzweil functions. *Hindawi Journal of Function Spaces*. https://doi.org/10.1155/2019/8948570.

Pouso, R. L., & Albés, I. M. (2018). General existence principles for Stieltjes differential equations with applications to mathematical biology. *Journal of Differential Equations*. 264. 10.1016/j.jde.2018.01.006.

Morales, G. M., Došlá, Z., & Mendoza, F. J. (2020). Riemann-Liouville derivative over the space of integrable distributions. *Electronic Research Archive, 28,* 567-587. https://doi.org/10.3934/era.2020030.

Potocan, V., Mulej, M., & Nedelko, Z. (2020). Society 5.0: Balancing of Industry 4.0, economic advancement and social problems. *Kybernetes. ahead-of-print.* https://doi.org/10.1108/K-12-2019-0858.

Sánchez-Perales, S. (2017). The initial value problem for the Schrödinger equation involving the Henstock-Kurzweil integral. *Revista de la Unión Matemática Argentina*, *58*. 297-306.

Sánchez-Perales, S., & Mendoza-Torres, F.J. (2020). Boundary value problems for the Schrödinger equation involving the Henstock-Kurzweil integral. *Czech Math J*, *70*, 519–537. https://doi.org/10.21136/CMJ.2019.0388-18

Sánchez-Perales, S., Pérez Becerra, T., Vázquez-Hipólito, V., & Oliveros-Olveros, J. (2021). Sturm-Liouville differential equations involving Kurzweil-Henstock integrable functions. *Mathematics*, *9, 1403.* https://doi.org/10.3390/math9121403.

Soemantri, R. (2014). *BMP MATA4320 Analisis II* (Edisi 2). Tangerang Selatan. Penerbit Universitas Terbuka.

Royden, H.L., & Fitzpatrick, P.M. (2015). *Real Analysis* (4th Ed.). Penerbit Pearson.

Yasa, A., Suswanta, Rafi, M., Rahmanto, F., Setiawan, D., & Fadhlurrohman, M. I. (2021). Penguatan reformasi birokrasi menuju era Society 5.0 di Indonesia. *Nakhoda: Jurnal Ilmu Pemerintahan*, *20*(1), 27-42.

Ye, G., & Liu, W. (2016). The distributional Henstock-Kurzweil integral and applications: A survey. *J. Math. Study*, *49*(4), 433-448. https://doi.org/10.4208/jms.v49n4.16.06.

Ye, G., Zhang, M., Liu, W., & Zhao, D. (2019). Existence and Uniqueness of Solutions to Distributional Differential Equations Involving Henstock-Kurzweil-Stieltjes Integrals. *Revista De La Unión Matemática Argentina, 60(2),* 443-458. https://doi.org/10.33044/revuma.v60n2a11.

----------. https://towardsdatascience.com/. Diakses pada 20 Juli 2022.

REPRESENTASI TUNGGAL ALJABAR-*C** DARI GRAF BERARAH BARIS-BERHINGGA

UNIQUE REPRESENTATION OF C-ALGEBRA OF ROW-FINITE DIRECTED GRAPH*

Wahyu Hidayat

Program Studi Matematika, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

wahyuhidayat@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

*Suatu graf berarah baris-berhingga merupakan sistem terbilang (diskret) yang terdiri atas himpunan simpul, himpunan panah, dan dua fungsi (fungsi sumber dan fungsi hasil) yang menghubungkan kedua elemen himpunan tersebut secara berhingga. Hubungan antara simpul dan panah melalui fungsi sumber dan fungsi hasil memiliki keserupaan dengan hubungan antara proyeksi ortogonal dan isometri parsial. Dalam hal ini, jika S adalah isometri parsial, maka S*S merupakan proyeksi ortogonal pada subruang dari daerah asal dan SS* merupakan proyeksi ortogonal pada subruang dari daerah hasil. Proyeksi ortogonal dan isometri parsial merupakan anggota dari B(H) yaitu himpunan operator linier terbatas pada ruang Hilbert H yang merupakan suatu aljabar-C*. Dengan demikian suatu graf berarah baris-berhingga dapat dikaitkan dengan suatu aljabar-C*. Kaitan tersebut dilakukan dengan merepresentasikan simpul sebagai proyeksi ortogonal dan panah sebagai isometri parsial yang tertuang dalam relasi Cuntz-Krieger. Relasi tersebut membentuk sebuah keluarga yang disebut keluarga Cuntz-Krieger. Dari keluarga Cuntz-Krieger dihasilkan sebuah himpunan operator dengan bentuk* $S_\alpha S_\beta^*$*, yaitu komposisi dua buah isometri parsial dari setiap dua lintasan* α *dan* β *pada graf yang merupakan elemen pembangun suatu aljabar-C* dari graf. Aljabar-C* yang dibentuk dari sebuah graf berarah baris berhingga pada akhirnya akan bersifat universal sehingga setiap graf akan memiliki padanan aljabar-C* yang tunggal.*

Hasil yang demikian akan memberikan manfaat dalam menggambarkan aljabar-C yang sebelumnya bersifat abstrak menjadi memiliki bentuk berupa graf berarah baris-berhingga.*

Kata Kunci: *baris-berhingga, isometri parsial, keluarga cuntz-krieger, proyeksi orthogonal.*

ABSTRACT

*A finite-row directed graph is a discrete system consists of vertices set, directed edges set, and two functions (source and range function) finitely connecting each elements of the two set. The relationship between vertices and directed edges by the two functions has the similarity to the relationship between orthogonal projections and partial isometries. In this case, if S is partial isometry, then S*S is an orthogonal projections on a subspace of the domain and SS* is an orthogonal projections on a subspace of the range. Orthogonal projections and partial isometries are element of B(H), the set of bounded linier operators on Hilbert space H, in which is a C*-algebra. Thus, a finite-row directed graph could be associated with a C*-algebra, by represent a vertex as an orthogonal projection and a directed edge as a partial isometry which contained in the Cuntz-Krieger relations. These relations form a family called the Cuntz-Krieger family. From the Cuntz-Krieger family, obtained a set of operators of the form* $S_\alpha S_\beta^*$*, the composition of two partial isometries of every two paths* α *and* β *of the graph, which are the generators of C*-algebra of the graph. The C*-algebra will eventually be universal so that every finite-row directed graph would have unique C*-algebra. This result will provide benefit in describing a C*-algebra which previously is abstract to have an image in the form of finite-row directed graph.*

Keywords: *finite-row, partial isometry, cuntz-krieger family, orthogonal projection.*

PENDAHULUAN

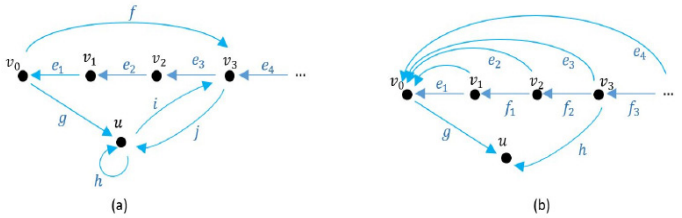
Mekanika kuantum sangat berperan dalam inovasi teknologi saat ini, antara lain di bidang kriptografi (Schneier, 1993), fotosintesis *booster* (Cartlidge, 2010), komputer kuantum untuk AI atau *Artificial Intelligence* (IBM, 2017), dan masih banyak lagi. Namun demikian, untuk memahami mekanika kuantum diperlukan pengetahuan teori fisika yang sangat dalam dan kemampuan memodelkan perilaku fisis yang muncul. Dalam upaya *Accelerating Sustainable Innovation towards Society 5.0*, beberapa matematikawan telah mengembangkan suatu teori untuk memodelkan pengamatan fisis pada mekanika kuantum, yaitu Aljabar-C*.

Aljabar-C* merupakan suatu struktur aljabar abstrak dengan tingkatan yang tinggi. Pada tahun 2005, Raeburn mengaitkan konsep abstrak aljabar-C* dengan graf berarah baris-berhingga (*finite-row directed graph*) sehingga operator-operator aljabar dapat memiliki representasi yang lebih nyata, yakni berupa gambar graf berarah baris-berhingga. Oleh karena itu, dengan memvisualisasi aljabar-C* berupa graf berarah baris-berhingga, diharapkan dapat memodelkan dan memvisualisasikan pengamatan fisis dari mekanika kuantum. Pemodelan mekanika kuantum melalui graf dari aljabar-C* dapat dipelajari pada Brownhole (2022) yang membahas tentang kegunaan aljabar-C* untuk pemodelan sistem kuantum melalui pengenalan KMS (Kubo-Martin-Schwinger *states*), Huef, Laca, Raeburn, & Sims (2013) yang membahas tentang kondisi KMS pada aljabar-C*, dan Schmidt dan Weber (2017) yang membahas tentang simetri kuantum pada aljabar-C* graf.

Terkait dengan konsep aljabar-C* dan graf berarah baris-berhingga, berikut ini dibahas terminologi dan notasi yang digunakan. Suatu graf berarah baris-berhingga E merupakan suatu sistem $\left(E^0, E^1, s, r\right)$ yang terdiri dari E^0 himpunan simpul, E^1 himpunan garis berarah atau panah, dan dua buah fungsi, yakni fungsi sumber s yang menghubungkan antara panah dengan simpul sumbernya dan fungsi hasil r yang menghubungkan antara panah dengan simpul ujungnya. *Baris-berhingga* artinya setiap simpul ujungnya hanya memiliki prapeta atau menerima berhingga panah (Bates, Pask, Raeburn & Szymanski, 2000).

Pada umumnya graf tidak harus memakai sistem garis berarah, namun pada artikel ini hanya dibatasi untuk graf berarah saja sehingga untuk penyebutan berikutnya hanya akan dinamakan graf saja.

Sebagai contoh, perhatikan graf berikut



Gambar 1. (a) Contoh Graf Berarah Baris-Berhingga; (b) Contoh Bukan Graf Berarah Baris-Berhingga

Gambar 1(a) memiliki himpunan simpul $E^0 = \{u, v_0, v_1, v_2, v_3, \ldots\}$ dan himpunan panah. $E^1 = \{f, g, h, i, j, e_1, e_2, e_3, e_4, \ldots\}$ Meskipun banyaknya simpul dan v_3 panah adalah tak berhingga, setiap simpul ujungnya paling banyak menerima 3 panah yaitu simpul *u* dan v_3. Dengan demikian, graf di atas merupakan graf berarah baris-berhingga. Berbeda halnya dengan Gambar 1(b), terdapat simpul ujung yang menerima tak berhingga bahnyaknya panah yaitu v_0 yang menerima panah dari e_n, untuk $n \in \mathbb{N}$, yang artinya graf berarah pada Gambar 1(b) bukan merupakan graf berarah baris-berhingga.

Raeburn (2005) menghubungkan graf dan aljabar-*C** dengan merepresentasikan setiap simpul sebagai proyeksi ortogonal dan setiap panah dengan isometri parsial. Proyeksi ortogonal dan isometri parsial pada suatu ruang Hilbert *H* merupakan contoh operator linier terbatas. Dalam hal ini, *B(H)* adalah himpunan semua operator linier terbatas pada suatu ruang Hilbert *H*. Dengan dilengkapi norm supremum dan adjoin operator sebagai involusi, *B(H)* merupakan aljabar-*C**. Terminologi dan notasi yang digunakan dalam artikel ini sebagian besar merujuk pada Raeburn (2005).

Definisi 1.1 (Brownhole, 2022)

1. Ruang vektor *A* atas $\mathbb{C}$ disebut *aljabar atas* $\mathbb{C}$ jika dilengkapi operasi perkalian asosiatif dan untuk setiap $u,v,w \in A$ dan $k \in \mathbb{C}$ memenuhi

$$u(v+w) = uv + uw;$$

$$(u+v)w = uw + vw; \text{ dan}$$

$$a(kb) = (ka)b = k(ab).$$

2. Aljabar *A* atas $\mathbb{C}$ disebut *aljabar-* $*$ jika dilengkapi sebuah involusi, yakni pemetaan $a \mapsto a^*$ yang memenuhi

$$(ku + lv)^* = \bar{k}u^* + \bar{l}v^*;$$

$$(uv)^* = v^*u^*; \text{ dan}$$

$$(u^*)^* = u, \forall u,v \in A \text{ dan } l,w \in \mathbb{C}$$

3. Ruang bernorm *A* disebut *ruang Banach* jika *A lengkap*, yakni setiap barisan Cauchy di A konvergen.
4. Ruang Banach A atas $\mathbb{C}$ disebut *aljabar Banach* jika *A* merupakan aljabar atas $\mathbb{C}$ dan memenuhi

$$\|ab\| \le \|a\|\|b\|, \qquad \forall a,b \in \mathbb{C}.$$

5. Aljabar Banach A atas $\mathbb{C}$ disebut *aljabar-C** jika dilengkapi involusi yang memenuhi identitas-*C** yakni

$$\|a^*a\| = \|a\|, \qquad \forall a, \in A.$$

Pandang *H* sebagai ruang Hilbert, yakni ruang hasilkali dalam dengan norm yang diinduksi dari hasilkali dalam, $\|h\| = \langle h,h \rangle^{\frac{1}{2}}$, dan *tertutup* yaitu setiap barisan Cauchy di *H* konvergen di *H* (Rudin, 1987).

Teorema 1.2 (Raeburn, 2005)
Setiap ruang vektor bernorm berdimensi hingga adalah lengkap dan setiap subruang berdimensi hingga dari ruang vektor bernorm adalah subruang tertutup.

Definisi 1.3 (MacCluer, 2009)
Misalkan H_1 dan H_2 ruang Hilbert. Pemetaan $T : H_1 \to H_2$ disebut *operator linier* jika $\forall x, y \in H_1$ dan $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ memenuhi

$$T\left(\alpha x + \beta y\right) = \alpha Tx + \beta Ty$$

Lebih lanjut, jika terdapat suatu $k > 0$ sehingga

$$\|Tx\| \le k\|x\|$$

maka T disebut *operator linier terbatas*.

Untuk T operator linier terbatas, jika dipilih $\|x\| \le 1$ maka $\|Tx\| \le k$, yang artinya $\| Tx \|$ terbatas di atas sehingga memiliki supremum. Dengan demikian

$$\left\| T \right\| = \sup\left\{ \left\| Tx \right\| : \left\| x \right\| \le 1 \right\}$$

terdefinisi dan dapat mendefinisikan suatu norm (Ian, 2019).

Definisi 1.4 (MacCluer, 2009)
Misalkan *T* operator linier terbatas pada ruang Hilbert *H*. *Operator adjoin* dari *T*, dinotasikan *T**, adalah operator yang memenuhi

$$\left\langle Tx, y \right\rangle = \left\langle x, T^* y \right\rangle, \quad \forall x, y \in H.$$

Teorema 1.5 (MacCluer, 2009)
Setiap operator linier terbatas pada ruang Hilbert memiliki adjoin tunggal.

Teorema 1.6 (MacCluer, 2009)
Misalkan T_1 dan T_2 operator pada ruang Hilbert, maka berlaku

1. $\left(T_1+T_2\right)^* = T_1^* + T_2^*$
2. $\left(\alpha T_1^*\right) = \bar{\alpha} T_1^*, \quad \forall \alpha \in \mathbb{C}$
3. $\left(T_1 T_2\right)^* = T_2^* T_1^*$
4. $\left(T_1^*\right)^* = T_1$
5. $\left\|T_1^*\right\| = \left\|T_1\right\|$
6. $\left\|T_1^* T_1\right\| = \left\|T_1\right\|^2$

Misalkan *H* ruang Hilbert, pandang kembali

$$B(H) = \{T : H \to H | T \text{ linier dan terbatas}\}.$$

Jika $\forall S,T \in B(H)$ didefinisikan

$$\left(S+T\right)x = Sx + Tx, \ \forall x \in H$$

$$\left(kT\right)x = kTx, \forall x \in H, k \in \mathbb{C}$$

kemudian dilengkapi dengan operasi perkalian melalui komposisi operator dan norm $\|T\| = \sup\left\{\|Tx\| : \|x\| \le 1\right\}$, maka *B*(*H*) merupakan aljabar Banach (MacCluer, 2009).

Selanjutnya dengan adjoin operator sebagai involusi, maka dari Teorema 1.6, *B*(*H*) merupakan suatu aljabar-*C**. Dengan demikian, setiap subruang tertutupnya pun merupakan subaljabar-*C**. Selanjutnya, sebarang subaljabar-*C** dari B(H) akan dituliskan sebagai aljabar-*C*B*, yaitu aljabar-*C** yang setiap anggotanya merupakan representasi tunggal dari operator linier terbatas dari B(H). Representasi yang dimaksud adalah memandang operator-operator linier terbatas sebagai elemen dari suatu aljabar-*C** dibandingkan sebagai pemetaan. Representasi sendiri adalah suatu homomorfisma-*, yakni $\pi : U \to V$ homomorfisma aljabar-*C** yang memenuhi $\pi\left(a^*\right) = \left(\pi(a)\right)^*$. Adapun representasi tunggal artinya representasi tersebut bersifat injektif (Conway, 2000).

Definisi 1.7 (Raeburn, 2005)
Misalkan *M* adalah subruang tertutup dari suatu ruang Hilbert *H*. Operator $P : H \to H$ disebut *proyeksi ortogonal* pada *M* jika $\forall x \in H,$ maka dan $(x - Px) \perp M.$.

Teorema 1.8 (Raeburn, 2005)
Suatu operator *P* pada suatu ruang Hilbert *H* merupakan proyeksi ortogonal pada *M* subruang dari H jika dan hanya jika $P^2 = P = P^*$

Teorema 1.9 (Raeburn, 2005)
Misalkan *P* dan *Q* proyeksi ortogonal pada subruang dari ruang Hilbert H, maka semua pernyataan berikut ekivalen

1. $P(H) \perp Q(H)$
2. $QP = PQ = 0$
3. $P + Q$ *proyeksi ortogonal*

Definisi 1.10 (Raeburn, 2005)
Misalkan $L : H \to H$ adalah operator pada suatu ruang Hilbert *H*. Operator *L* disebut *isometri parsial* jika restriksi *L* pada $(\text{Inti } L)^{\perp}$ merupakan suatu isometri, yakni

$$\|Lx\| = \|x\|, \quad \forall x \in (\text{Inti} L)^{\perp}$$

Teorema 1.11 (Hines dan Braunstein, 2008)
*Operator L pada suatu ruang Hilbert H disebut isometri parsial jika dan hanya jika L*L merupakan proyeksi ortogonal.*

Teorema 1.12 (Brownhole, 2022)
Misalkan *S* adalah operator linier terbatas pada suatu ruang Hilbert *H*, maka semua pernyataan berikut ekuivalen:

1. *S isometri parsial*
2. SS*S = S
3. *S*SS* = S**
4. *SS* proyeksi ortogonal pada ruang hasil dari S.*

Dari uraian terkait proyeksi ortogonal dan isometri parsial di atas, dapat dilihat bahwa terdapat hubungan di antara keduanya, yakni jika S adalah isometri parsial, maka S^*S merupakan proyeksi ortogonal pada subruang daerah asal dari S, sedangkan SS^* merupakan proyeksi ortogonal pada ruang hasil dari S. Hubungan ini serupa dengan simpul dan panah yang mempunyai fungsi sumber dan fungsi hasil.

Korespondensi antara proyeksi ortogonal-isometri parsial sebagai bagian dari sistem aljabar-C^* operator linier terbatas dan simpul-panah sebagai sistem graf berarah perlu ditunjukkan ketunggalannya. Untuk itu, dalam artikel ini akan diuraikan suatu representasi tunggal aljabar-C^* melalui graf berarah baris berhingga sehingga aljabar-C^* yang sebelumnya merupakan sistem abstrak dapat memiliki visualisasi berdasarkan graf yang dibangunnya.

PEMBAHASAN

Seperti yang telah dijelaskan pada Pendahuluan, hubungan antara graf baris-berhingga dan aljabar-C^* diinisiasi oleh adanya kemiripan hubungan antara simpul-panah dan proyeksi ortogonal-isometri parsial. Pada awal pembahasan ini, akan dibahas mengenai keluarga Cuntz-Krieger yang akan memberikan dasar pembentukan aljabar-C^* melalui representasi simpul oleh proyeksi ortogonal dan panah oleh isometri parsial.

1. Keluarga Cuntz-Krieger

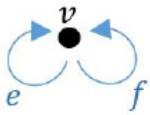
Keluarga Cuntz-Krieger merupakan suatu sistem yang terdiri atas proyeksi ortogonal dan isometri parsial yang akan menjadi pembangun aljabar-C^* dari graf berarah baris-berhingga yang diberikan. Berikut definisi formal dari keluarga Cuntz-Krieger.

Definisi 2.1.1 (Schmidt dan Weber, 2017)
Misalkan E adalah graf baris-berhingga dan H adalah suatu ruang Hilbert. *Keluarga Cuntz-Krieger* $E\{S,P\}$ pada H adalah keluarga yang terdiri atas himpunan proyeksi ortogonal $\{P_v : v \in E^0\}$ pada H yang saling ortogonal dan himpunan isometri parsial $\{S_e : e \in E^1\}$ pada H sedemikian sehingga

1. $S_e^* S_e = P_{s(e)}, \ \forall e \in E^1$ (CK1)

2. $P_\upsilon = \sum_{\{e \in E^1 : r(e) = \upsilon\}} S_e S_e^*$, dengan υ bukan simpul sumber (CK2)

Contoh 2.1.2
Perhatikan graf berikut



Gambar 2. Graf Simpul Tunggal dengan 2 *Loop*

Berdasarkan graf pada Gambar 2, P_υ satu-satunya proyeksi ortogonal dan $\{S_e, S_f\}$ sebagai himpunan isometri parsial. Dengan $s(e) = \upsilon = s(f)$ dan $r(e) = \upsilon = r(f)$ maka relasi Cuntz-Krieger yang harus dipenuhi adalah $S_e^* S_e = P_\upsilon = S_f^* S_f$ dan $P_\upsilon = S_e S_e^* + S_f S_f^*$.

Misalkan ruang Hilbert yang dipilih adalah

$$\ell^2(\mathbb{N}) = \left\{(x_n) : \Sigma |x_n|^2 < \infty\right\} = \overline{span}\{e_n : n \in \mathbb{N}\}$$

himpunan barisan bilangan kompleks dengan deret mutlak kuadrat konvergen. Definisikan $P_\upsilon = I$ sebagai pemetaan identitas pada $\ell^2(\mathbb{N})$, kemudian $S_e(e_n) = e_{2n}$ dan $S_f(e_n) = e_{2n+1}$. Perhatikan $\forall j \in \mathbb{N}$

$$\begin{aligned}\langle S_e^*(e_n), e_j \rangle &= \langle e_n, S_e(e_j) \rangle \\ &= \langle e_n, e_{2j} \rangle \\ &= \begin{cases} 1 & \text{jika } n = 2j (\text{genap}) \\ 0 & \text{jika } n \neq 2j (\text{ganjil}) \end{cases}\end{aligned}$$

$$\langle S_e^*(e_n), e_j \rangle = \begin{cases} \langle e_{n/2}, e_j \rangle & \text{jika } j = n/2 (n\text{genap}) \\ \langle 0, e_j \rangle & \text{jika } j \neq n/2 (n\text{ganjil}) \end{cases}$$

maka $S_e^* = \begin{cases} e_{n/2} & jika\, n\, genap \\ 0 & jika\, n\, ganjil. \end{cases}$

Dengan cara serupa akan diperoleh $S_f^* = \begin{cases} 0 & jika\, n\, genap \\ e_{(n-1)/2} & jika\, n\, ganjil. \end{cases}$

Jelas bahwa $\left(P_\upsilon\right)^2 = I^2 = I = P_\upsilon$ dan $\left(P_\upsilon\right)^* = I^* = I = P_\upsilon$ yang artinya P_υ merupakan proyeksi ortogonal. Kemudian perhatikan $S_e^* S_e\left(e_n\right) = S^*\left(e_{2n}\right) = e_n = I\left(e_n\right)$, begitu pula $S_f^* S_f\left(e_n\right) = S^*\left(e_{2n+1}\right) = e_n$ maka $S_e^* S_e = S_f^* S_f = I = P_\upsilon$ proyeksi ortogonal. Dengan demikian, S_e dan S_f merupakan isometri parsial sekaligus memenuhi CK1.
Selanjutnya, perhatikan untuk sebarang $\left(x_n\right) \in \ell^2\left(\mathbb{N}\right)$,

$$\begin{aligned} S_e S_e^*\left(x_n\right) &= S_e S_e^*\left(x_0 e_0 + x_1 e_1 + x_2 e_2 + \ldots\right) \\ &= S_e\left(x_0 S_e^*\left(e_0\right) + x_1 S_e^*\left(e_1\right) + x_2 S_e^*\left(e_2\right) + \ldots\right) \\ &= S_e\left(x_0 e_0 + x_1.0 + x_2 e_1 + \ldots\right) \\ &= x_0 S_e\left(e_0\right) + x_2 S_e\left(e_1\right) + \ldots \\ &= x_0 e_0 + x_2 e_2 + \ldots \\ &= \left(x_0, 0, x_2, \ldots\right) \end{aligned}$$

Dengan cara serupa $S_f S_f^*\left(x_n\right) = \left(0, x_1, 0, x_3, \ldots\right)$
Dengan demikian,
$\left(S_e S_e^* + S_f S_f^*\right)\left(x_n\right) = S_e S_e^*\left(x_n\right) + S_f S_f^*\left(x_n\right) = \left(x_0, x_1, x_2, x_3, \ldots\right) = \left(x_n\right).$

Karenanya, $S_e S_e^* + S_f S_f^* = I = P_\upsilon$, memenuhi CK2.
Jadi, $\left\{P_v = I\right\}$ dan $\left\{S_e, S_f\right\}$ dengan definisi di atas merupakan keluarga Cuntz-Krieger untuk graf yang diberikan.

Teorema 2.1.3 (Raeburn, 2005)
Jika S_e adalah isometri parsial pada suatu keluarga Cuntz-Krieger $E\left\{S,P\right\}$ pada H untuk graf E, maka

$$S_e = P_{r(e)} S_e = S_e P_{s(e)}$$

Bukti.

Berdasarkan CK2, $S_e S_e^*$ merupakan bagian jumlahan untuk $P_{r(e)}$, maka $S_e H \subset P_{r(e)} H$.

Akibatnya $\forall h \in H,\ S_e(h) \in P_{r(e)} H$. Karena $P_{r(e)}$ proyeksi ortogonal, $P_{r(e)}(S_e(h)) = S_e(h)$. Jadi $S_e = P_{r(e)} S_e$.

Selanjutnya berdasarkan CK1 dan Teorema 1.12 (2), $S_e = S_e S_e^* S_e = S_e P_{s(e)}$. ■

2. Aljabar-*C** dari Graf Baris-Berhingga

Pada Pendahuluan telah dijelaskan bahwa proyeksi ortogonal dan isometri parsial merupakan anggota dari aljabar-*C*B*. Dengan demikian, dari sebuah graf baris-berhingga yang dapat dibentuk suatu keluarga Cuntz-Krieger, dapat dikonstruksi sebuah subaljabar-*C** dari aljabar-*C*B*.

Pembentukan aljabar-*C* dari graf berarah baris-berhingga secara langsung melalui keluarga Cuntz-Krieger tidaklah sederhana. Hal ini dikarenakan harus memilih terlebih dahulu ruang Hilbert, kemudian operator proyeksi ortogonal dan isometri parsial pada ruang Hilbert yang telah dipilih juga harus memenuhi relasi Cuntz-Krieger. Untuk itu, berikut ini diberikan beberapa teorema yang akan memudahkan dalam pembentukan aljabar-*C** dari graf baris-berhingga.

Teorema 2.2.1 (Raeburn, 2005)
*Jika E adalah graf baris-berhingga dan E{S,P} keluarga Cuntz-Krieger dari E bagian dari suatu aljabar-C*B, maka*

1. Proyeksi-proyeksi $\{S_e S_e^* : e \in E^1\}$ saling ortogonal
2. $S_e^* S_f \neq 0 \Rightarrow e = f$
3. $S_e S_f \neq 0 \Rightarrow s(e) = r(f)$
4. $S_e S_f^* \neq 0 \Rightarrow s(e) = s(f)$

Bukti:

1. Misalkan $e, f \in E^1$. Jika $r(e) = r(f)$ maka berdasarkan CK2,

$P_{r(e)}$ merupakan jumlahan dari proyeksi ortogonal $S_eS_e^*, S_fS_f^*,$ dan proyeksi-proyeksi ortogonal lainnya yang memiliki simpul ujung $r(e)$. Asumsikan $P_{r(e)} = S_eS_e^* + S_fS_f^*$ (untuk jumlahan yang lebih banyak dapat diinduksi).

Misalkan proyeksi ortogonal $S_eS_e^* = P$ dan $S_fS_f^* = Q$. Perhatikan $P + Q = (P+Q)^2 = P^2 + PQ + QP + Q^2 = P + PQ + QP + Q$

maka $QP = -PQ$. Selanjutnya, perhatikan

$$-PQ = P(-PQ)Q = P(QP)Q$$
$$= (PQ)^2 = (QP)^2 = Q(PQ)P$$
$$= Q(-QP)P = -QP = PQ$$

maka haruslah $PQ = 0$, begitu pula $QP = 0.$

Sekarang ambil $h, k \in H.$ Perhatikan

$$\langle Ph, Qk\rangle = \langle Q^*Ph, k\rangle = \langle QPh, k\rangle = \langle 0, k\rangle = 0$$

maka $P = S_eS_e^*$ dan $Q = S_fS_f^*$ saling ortogonal.

Untuk kasus jika $r(e) \neq r(f)$, dengan menggunakan Teorema 2.1.3, diperoleh

$$(S_eS_e^*)(S_fS_f^*) = \left(S_e\left(P_{r(e)}S_e\right)^*\right)\left(P_{r(f)}S_fS_f^*\right)$$
$$= \left(S_eS_e^*P_{r(e)}\right)\left(P_{r(f)}S_fS_f^*\right)$$
$$= \left(S_eS_e^*\right)0\left(S_fS_f^*\right)$$
$$= 0$$

maka $S_eS_e^*$ dan $S_fS_f^*$ saling ortogonal.

2. Misalkan $e \neq f$. Dengan menggunakan Teorema 1.12 dan bagian 1), diperoleh $S_e^*S_f = \left(S_e^*S_eS_e^*\right)\left(S_fS_f^*S_f\right) = S_e^*0S_f = 0$
3. Misalkan $s(e) \neq r(f).$ Dengan menggunakan Teorema 2.1.3, diperoleh $S_eS_f = \left(S_eS_{s(e)}\right)\left(P_{r(f)}S_f\right) = S_e0S_f = 0$

4. Misalkan $s(e) \neq s(f)$. Dengan menggunakan Teorema 2.1.3, diperoleh $S_e S_f^* = \left(S_e S_{s(e)}\right)\left(P_{r(f)} S_t^*\right) = S_e 0 S_f^* = 0.$

Perhatikan bagian 3) pada Teorema 2.2.1. Pernyataan $s(e) = r(f)$ menginterpretasikan bahwa simpul ujung dari *f* adalah simpul sumber bagi e, dengan kata lain pasangan panah ef adalah sebuah lintasan (*path*) dengan panjang 2.

Gambar 3. Sebuah Lintasan dengan Panjang 2 dari Suatu Graf

Secara umum, sebuah *lintasan dengan panjang n* pada suatu graf *E* adalah barisan panah $\mu = e_1 e_2 \ldots e_n$ di mana $s(e_i) = r(e_{i+1})$ untuk $1 \leq i \leq n-1$.

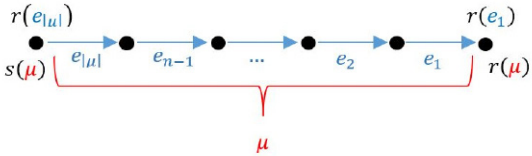
Gambar 4. Lintasan dengan Panjang *n* dari Suatu Graf

Panjang dari suatu lintasan μ dinotasikan dengan $|\mu|$. Dengan demikian, setiap satu buah panah merupakan sebuah lintasan dengan panjang 1, sedangkan setiap simpul dapat didefinisikan sebagai lintasan dengan panjang 0.

Selanjutnya, definisikan E^n sebagai himpunan semua lintasan dengan Panjang n dari suatu graf *E*. Ketika panjang lintasan n = 0 dan n = 1 maka menjadi E^0 dan E^1 yang dalam hal ini konsisten dengan definisi dua himpunan tersebut di awal sebagai himpunan simpul dan himpunan panah. Definisikan pula $E^* = \bigcup_{n \geq 0} E^n$ sebagai himpunan semua lintasan dari graf E (Brown, Fuller, Pitts, & Reznikoff, 2022).

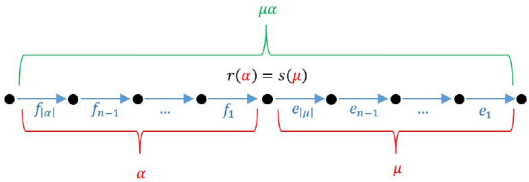
Fungsi sumber dan fungsi hasil juga dapat didefinisikan untuk lintasan pada E*. Hal ini konsisten dengan definisi sebelumnya, yakni jika lintasan $\mu = \{e_i\}_{|\mu|} \in E^*$, maka $r(\mu) = r(e_1)$

dan $s(\mu) = s(e_{|\mu|})$. Khusus untuk lintasan simpul tunggal $\upsilon \in E^0 \subset E^*$ maka $r(\upsilon) = \upsilon = s(\upsilon)$.



Gambar 5. Fungsi Sumber dan Fungsi Hasil untuk Lintasan dari Suatu Graf *E*

Jika $\mu = \{e_i\}_{|\mu|}$ dan $\alpha = \{f_i\}_{|\alpha|} \in E^*$ dengan $s(\mu) = r(\alpha)$, maka $\mu\alpha = e_1 e_2 \ldots e_{|\mu|} f f_2 \ldots f_{|\alpha|}$ lintasan dengan panjang $|\mu| + |\alpha|$.



Gambar 6. Lintasan Gabungan dari Suatu Graf *E*

Ingat kembali Teorema 2.2.1 bagian 3) tentang lintasan *ef* yang terbentuk akibat komposisi taknol dua buah isometri parsial yakni $S_e S_f \neq 0$. Secara umum, untuk lintasan $\mu = \{e_i\}_n$ dapat didefinisikan operator lintasan $S_\mu := S_{e_1} S_{e_2} \ldots S_{e_n}$ dan khusus untuk lintasan simpul $\upsilon \in E^*$, didefinisikan $S_v := P_v$. Faktanya, S_μ merupakan isometri parsial juga seperti yang dinyatakan dalam teorema berikut ini.

Teorema 2.2.2 (Raeburn, 2005)

Jika $\mu \in E^*$, maka S_μ merupakan isometri parsial dengan proyeksi awal $P_{s(\mu)}$ dan ruang final, $S_\mu H \subset P_{r(\mu)} H$ atau dengan kata lain

$$S_\mu^* S_\mu = P_{s(\mu)} \text{ dan } P_{r(\mu)} S_\mu S_\mu^* = S_\mu S_\mu^*$$

Bukti.
Misalkan $\mu = \{e_i\}_n \in E^*$ adalah lintasan dengan panjang *n*. Perhatikan bahwa

$$\begin{aligned} S_\mu^* S_\mu &= \left(S_{e_1} S_{e_2} \ldots S_{e_n}\right)^* S_{e_1} S_{e_2} \ldots S_{e_n} \\ &= S_{e_n}^* \ldots S_{e_2}^* \left(S_{e_1}^* S_{e_1}\right) S_{e_2} \ldots S_{e_n} \\ &= S_{e_n}^* \ldots S_{e_2}^* P_{s(e_1)} S_{e_2} \ldots S_{e_n} \\ &= S_{e_n}^* \ldots S_{e_2}^* P_{r(e_2)} S_{e_2} \ldots S_{e_n} \\ &= S_{e_n}^* \ldots S_{e_2}^* S_{e_2} \ldots S_{e_n} \\ &\vdots \\ &= S_{e_n}^* S_{e_n} = P_{s(\mu_n)} = P_{s(\mu)} \end{aligned}$$

Dengan demikian terbukti bahwa $S_\mu^* S_\mu$ merupakan proyeksi ortogonal awal $P_{s(\mu)}$.
Selanjutnya perhatikan bahwa

$$\begin{aligned} P_{r(\mu)} S_\mu S_\mu^* &= P_{r(e_1)} \left(S_{e_1} S_{e_2} \ldots S_{e_n}\right) S_\mu^* \\ &= \left(P_{r(e_1)} S_{e_1}\right) S_{e_2} \ldots S_{e_n} S_\mu^* \\ &= S_{e_1} S_{e_2} \ldots S_{e_n} S_\mu^* \\ &= S_\mu S_\mu^* \end{aligned}$$

Dengan demikian, ruang hasil dari S_μ adalah $P_{r(\mu)} H$. ■

Akibat 2.2.3 (Raeburn, 2005)
*Misalkan E adalah graf baris-berhingga dan E{S,P} adalah keluarga Cuntz-Krieger dari suatu aljabar-C*B. Jika* $\mu, \alpha \in E^*$, *maka*

1. jika $|\mu| = |\alpha|$ *dan* $\mu \neq \alpha$, *maka* $\left(S_\mu S_\mu^*\right)\left(S_\alpha S_\alpha^*\right) = 0$

2. $S_\mu^* S_\alpha = \begin{cases} S_{\mu'}^* & jika\ \mu = \alpha\mu',\ \exists \mu' \in E^* \\ S_{\alpha'}^* & jika\ \alpha = \mu\alpha',\ \exists \alpha' \in E^* \\ 0 & lainnya \end{cases}$

3. *jika* $S_\mu S_\alpha \neq 0$, *maka* $\mu\alpha \in E^*$ *dan* $S_\mu S_\alpha = S_{\mu\alpha}$

4. *jika* $S_\mu S_\alpha^* \neq 0$, *maka* $s(\mu) = s(\alpha)$

Bukti

1. Misalkan $\mu = \{e_i\}_n$ dan $\alpha = \{f_i\}_n \in E^*$ yakni lintasan dengan panjang $|\mu| = |\alpha| = n$ dan *i* adalah bilangan bulat terkecil sehingga $e_i \neq f_i$. Karena untuk $1 \leq j \leq i-1, e_i = f_i$ maka dengan menggunakan cara serupa pada pembuktian Teorema 2.2.2,

$$\begin{aligned} S_\mu^* S_\alpha &= \left(S_{e_1} S_{e_2} \ldots S_{e_{i-1}} S_{e_i} \ldots S_{e_n}\right)^* S_{f_1} S_{f_2} \ldots S_{f_{i-1}} S_{f_i} \ldots S_{f_n} \\ &= S_{e_n}^* \ldots S_{e_i}^* \left(S_{e_{i-1}}^* \ldots S_{e_1}^*\right)\left(S_{e_1} \ldots S_{e_{i-1}}\right) S_{f_i} \ldots S_{f_n} \\ &= S_{e_n}^* \ldots S_{e_i}^* P_{s(e_{i-1})} S_{f_i} \ldots S_{f_n} \\ &= S_{e_n}^* \ldots S_{e_i}^* P_{r(e_{i-1})} S_{f_i} \ldots S_{f_n} \\ &= S_{e_n}^* \ldots S_{e_i}^* S_{f_i} \ldots S_{f_n} \end{aligned}$$

Karena $e_i \neq f_i$ maka berdasarkan Teorema 2.2.1 bagian 2), $S_{e_i}^* S_{f_i} = 0$. Akibatnya, $S_\mu^* S_\alpha = 0$ juga. Jadi, $\left(S_\mu S_\mu^*\right)\left(S_\alpha S_\alpha^*\right) = 0.$

2. Misalkan $n = |\mu| \leq |\alpha|$ sehingga dapat dibuat faktorisasi $\alpha = \beta\alpha'$ dengan $|\beta| = n$. Perhatikan

$$S_\mu^* S_\alpha = S_\mu^* \left(S_\beta S_{\alpha'}\right) = \left(S_\mu^* S_\beta\right) S_{\alpha'}$$

Jika $\alpha = \beta$ (artinya $\alpha = \mu\alpha'$), maka berdasarkan Teorema 2.2.2

$$S_\mu^* S_\alpha = \left(S_\mu^* S_\beta\right) S_{\alpha'} = P_{s(\mu)} S_{\alpha'} = P_{r(\alpha')} S_{\alpha'} = S_{\alpha'}$$

Jika $\mu \neq \beta$, seperti pada pembuktian bagian 1), $S_\mu^* S_\alpha = \left(S_\mu^* S_\beta\right) S_{\alpha'} = 0.$

Untuk mendapatkan kasus $\mu = \alpha\mu'$, dapat diuraikan dengan cara serupa ketika $|\mu| > |\alpha|$ sehingga $\mu = \nu\mu'$ untuk suatu $\nu \in E^*$.

3. Misalkan $\mu\alpha$ bukan lintasan, maka $r(\alpha) = r(f_1) \neq s(e_n) = s(\mu)$. Akibatnya berdasarkan Teorema 2.2.1 bagian 3)

$$S_\mu S_\alpha = S_{e_1} S_{e_2} \ldots S_{e_n} S_{f_1} S_{f_2} \ldots S_{f_n} = S_{e_1} S_{e_2} \ldots S_{e_{n-1}} 0\, S_{f_2} \ldots S_{f_n} = 0$$

Jadi, jika $S_\mu S_\alpha \neq 0$, maka $\mu\alpha$ haruslah sebuah lintasan. Akibatnya, $S_\mu S_\alpha = S_{\mu\alpha}$.

4. Misalkan $s(e_n) = s(\mu) \neq s(\alpha) = s(f_n)$, maka dari Teorema 2.2.1 bagian 4)

$$\begin{aligned} S_\mu S_\alpha^* &= \left(S_{e_1} S_{e_2} \ldots S_{e_n}\right)\left(S_{f_1} S_{f_2} \ldots S_{f_n}\right)^* \\ &= S_{e_2} \ldots S_{e_n} S_{f_n}^* \ldots S_{f_1}^* \\ &= S_{e_2} \ldots S_{e_{n-1}} 0 S_{f_{n-1}}^* \ldots S_{f_1}^* \\ &= 0 \end{aligned}$$

■

Akibat 2.2.4 (Raeburn, 2005)
*Misalkan E adalah graf baris-berhingga dan E{S,P} adalah keluarga Cuntz-Krieger dari suatu aljabar-C*B. Jika* $\mu, \nu, \alpha, \beta \in E^*$, *maka*

$$\left(S_\mu S_\nu^*\right)\left(S_\alpha S_\beta^*\right) = \begin{cases} S_{\mu\alpha'} S_\beta^* & jika\ \alpha = \nu\alpha',\ \exists \alpha' \in E^* \\ S_\mu S_{\beta\nu'}^* & jika\ \nu = \alpha\nu',\ \exists \alpha' \in E^* \\ 0 & lainnya \end{cases}$$

Bukti.
Dengan mengaplikasikan Akibat 2.2.3 bagian 2) pada $S_\nu^* S_\alpha$, maka

$$\left(S_\mu S_\nu^*\right)\left(S_\alpha S_\beta^*\right) = S_\mu\left(S_\nu^* S_\alpha\right)S_\beta^* = \begin{cases} S_\mu S_{\alpha'} S_\beta^* & \text{jika } \alpha = \nu\alpha',\ \exists\alpha' \in E^* \\ S_\mu S_\nu^* S_\beta^* & \text{jika } \nu = \alpha\nu',\ \exists\alpha' \in E^* \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} S_{\mu\alpha'} S_\beta^* & \text{jika } \alpha = \nu\alpha',\ \exists\alpha' \in E^* \\ S_\mu S_{\beta\nu'}^* & \text{jika } \nu = \alpha\nu',\ \exists\alpha' \in E^* \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases}$$

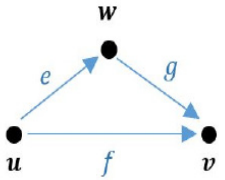
■

Berdasarkan Akibat 2.2.4 di atas dapat dilihat bahwa hasil perkalian antar bentuk $S_\mu S_\upsilon^*$ akan tetap memberikan bentuk yang serupa, yang artinya operasi perkalian bentuk ini bersifat tertutup. Dengan demikian, $\text{span}\left\{S_\mu S_\nu^* : \mu,\nu \in E^*, s(\mu) = s(\nu)\right\}$ merupakan subaljabar dari aljabar-C*B. Pada akhirnya *span* tertutup bentuk tersebut merupakan sebuah subaljabar-C* dari B yang selanjutnya subaljabar-C* tersebut dinotasikan C*(S,P), dengan notasi S dan P berturut-turut merupakan operator-operator isometri parsial dan proyeksi ortogonal yang memenuhi keluarga Cuntz-Krieger dari graf baris-berhingga E.

Akibat 2.2.5 (Raeburn, 2005)
Jika E{S,P} adalah keluarga Cuntz-Krieger dari graf baris-berhingga E, maka $C^*(S,P) = \overline{\text{span}}\left\{S_\mu S_\nu^* : \mu,\nu \in E^*, s(\mu) = s(\nu)\right\}$

Bukti.
Misalkan *C*(S,P)* adalah aljabar-*C** yang dibangun oleh keluarga Cuntz-Krieger *E{S,P}*. Selanjutnya misalkan M, $\text{span}\left\{S_\mu S_\nu^* : \mu,\nu \in E^*, s(\mu) = s(\nu)\right\}$. Berdasarkan Akibat 2.2.4, maka *M* merupakan subaljabar dari *C*(S,P)*. Karena $\left(S_\mu S_\nu^*\right)^* = S_\mu S_\nu^*$, diperoleh M subaljabar-* dari *C*(S,P)*. Akibatnya penutup dari M, $\overline{\text{span}}\left\{S_\mu S_\nu^* : \mu,\nu \in E^*, s(\mu) = s(\nu)\right\}$, merupakan subaljabar-C*.

Contoh 2.2.6
Perhatikan graf berikut



Gambar 7. Graf Aturan Segitiga Vektor

Lintasan yang dapat dibentuk dari graf di atas:
- lintasan dengan sumber *u* adalah *u, e, f,* dan *ge*
- lintasan dengan sumber *v* adalah *v*
- lintasan dengan sumber *w* adalah *w, g*

Dengan demikian, $E^* = \{u,e,f,ge\} \cup \{v\} \cup \{w,g\}$.

Pertimbangkan subruang untuk himpunan lintasan {*u, e, f, ge*}

$$M = span\left\{S_\mu S_\nu^* : \mu,\nu \in \{u,e,f,ge\}\right\}$$

Perhatikan untuk setiap lintasan yang bukan memiliki sumber *u*:
- lintasan dengan sumber *w*

$$S_w S_w^* = P_w P_w^* = P_w = S_e S_e^* \in M,$$

$$S_g S_g^* = S_g P_w S_g^* = S_g\left(S_e S_e^*\right) S_g^* = S_{ge} S_{ge}^* \in M,$$

$$S_w S_g^* = P_w S_g^* = \left(S_e S_e^*\right) S_g^* = S_e S_{ge}^* \in M, \text{ dan}$$

$$S_g S_w^* = S_g P_w^* = S_g\left(S_e S_e^*\right) = S_{ge} S_e^* \in M.$$

- lintasan dengan sumber *v*

$$S_v S_v^* = P_v P_v^* = P_v = S_f S_f^* + S_g S_g^* = S_f S_f^* + S_{ge} S_{ge}^* \in M$$

Ini berarti M mewakili semua lintasan dari E*. Karena M berdimensi hingga (kombinasi μ dan ν adalah 2^4 dengan 4 berasal dari $\left|\{u,e,f,ge\}\right|$), berdasarkan Teorema 1.2, diperoleh M tertutup. Dengan demikian berdasarkan Akibat 2.2.4,

$$C^*(S,P) = \text{span}\left\{S_\mu S_\nu^* : \mu,\nu \in \{u,e,f,ge\}\right\}$$

Perhatikan bahwa di antara anggota $\{u,e,f,ge\}$, tidak ada lintasan yang merupakan gabungan dari lintasan lainnya yang ada pada himpunan tersebut (ge merupakan gabungan lintasan g dan *e*, namun *g* tidak ada di himpunan tersebut), maka Akibat 2.2.3 hanya dipenuhi untuk kasus $\alpha = \nu$.

Dengan demikian,

$$\left(S_\mu S_\nu^*\right)\left(S_\alpha S_\beta^*\right) = \begin{cases} S_\mu S_\beta^* & \text{jika } \alpha = \nu \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \qquad (*)$$

Sekarang perhatikan matriks kompleks dengan baris dan kolom menggunakan indeks $\mu,\nu \in \{u,e,f,ge\}$, yakni matriks $E_{\mu\nu}$ dengan

$$\left(E_{\mu\nu}\right)_{kl} = \begin{cases} 1 & \text{jika } k = \mu \text{ dan } l = \nu \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases}$$

Sebagai contoh, matriks E_{ue} akan bernilai 1 pada entri baris ke *u* dan kolom ke e, dan bernilai 0 pada entri lainnya, maka

$$E_{ue} = \begin{array}{c} \textit{Indeks kolom} \\ \begin{array}{cccc} e & u & f & ge \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} e \\ u \\ f \\ ge \end{array} \end{array} \quad \text{indeks baris}$$

Dengan demikian, $E_{ue}\left\{E_{\mu\nu} : \mu,\nu \in \{u,e,f,ge\}\right\}$ merupakan basis untuk $M_4(\mathbb{C})$.

Perhatikan

$$E_{\mu\nu}.E_{\alpha\beta} = \begin{cases} E_{\mu\beta} & \text{jika} \alpha = \nu \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases}$$

memberikan hasil indeks serupa dengan (*). Akibatnya, jika didefinisikan pemetaan

$$\phi : C^*(S,P) \to M_4(\mathbb{C})$$
$$S_\mu S_\nu^* \mapsto E_{\mu\nu}, \quad \forall \mu,\beta \in \{u,e,f,ge\}$$

maka ϕ merupakan isomorfisma. Dengan kata lain, $C^*(S,P) \cong M_4(\mathbb{C})$.

Hasil ini memberikan gambaran bahwa himpunan matriks kompleks berukuran 4 x 4 sebagai aljabar-*C** akan memiliki padanan berupa graf berarah dengan 3 simpul dan 3 panah dengan arah membentuk aturan segitiga pada penjumlahan vektor.

Secara umum, hasil pada Contoh 2.2.6 dapat digeneralisasi untuk sebarang graf baris-berhingga tanpa siklus, yaitu suatu lintasan $\mu = e_1 e_2 \ldots e_1$ atau memenuhi $r(\mu) = s(\mu) = e_1$ dan $s(e_i) \neq s(e_j)$ untuk $i \neq j$. Sebagaimana teorema berikut.

Teorema 2.2.7 (Raeburn, 2005)
Misalkan *E* adalah suatu graf baris-berhingga tanpa siklus dan $v_1, v_2, \ldots, v_n$ adalah simpul-simpul sumber di *E*. Untuk setiap keluarga Cuntz-Krieger *E*{*S*,*P*} dengan setiap P_v tak nol, maka

$$C^*(S,P) \cong \oplus_{i=1}^{n} M_{\left|s^{-1}(v_i)\right|}(\mathbb{C})$$

dengan $s^{-1}(v_i) = \{\mu \in E^* : s(\mu) = v_i\}$.

Bukti.
Untuk sebarang $i \in \{1,2,\ldots,n\}$, misalkan

$$A_i = \text{span}\{S_\mu S_\alpha^* : s(\mu) = s(\alpha) = v_i\}.$$

Berdasarkan cara yang serupa dengan uraian Contoh 2.2.6 di atas, dengan banyaknya lintasan pada A_i adalah $\left|s^{-1}(v_i)\right|$, maka

$$A \cong M_{\left|s^{-1}(v_i)\right|}(\mathbb{C}).$$

Selanjutnya, misalkan untuk $i \neq j, s(\mu) = v_i$, dan $s(\alpha) = v_j$ yang artinya $s(\mu) \neq s(\alpha)$, maka berdasarkan Akibat 2.2.3 (4), $S_\mu S_\alpha^* = 0$. Ini berarti $A_i \cap A_j = \{0\}$ untuk setiap $i \neq j$

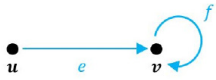
Dengan demikian jumlah langsung dari bentuk A_i isomorfik dengan $\text{span}\left\{\bigcup_{i=1}^{n} A_i\right\}$, yakni

$$\oplus_{i=1}^{n} A_i \cong \text{span}\left\{\bigcup_{i=1}^{n} A_i\right\}$$
$$\oplus_{i=1}^{n} M_{\left|s^{-1}(v_i)\right|}(\mathbb{C}) \cong C^*(S,P)$$

■

Contoh 2.2.8

Diberikan graf dengan dua simpul dan sebuah loop sebagai siklus seperti pada Gambar 8 berikut



Gambar 8. Graf yang Memuat Siklus

Relasi CK1 yang harus dipenuhi oleh graf *E* di atas adalah $P_u = S_e^* S_e$ dan $P_v = S_f^* S_f$. Di lain pihak, relasi CK2 yang harus dipenuhi adalah $P_v = S_e S_e^* + S_f^* S_f$.

Perhatikan

$$S_e(P_u + P_v) = S_e P_u + S_e P_v = S_e S_e^* S_e + S_e S_f^* S_f = S_e + 0 = S_e,$$
$$S_f(P_u + P_v) = S_f P_u + S_f P_v = S_f S_e^* S_e + S_f S_f^* S_f = 0 + S_f = S_f,$$
$$P_u(P_u + P_v) = P_u P_u + P_u P_v = P_u + 0 = P_u, \text{ dan}$$
$$P_v(P_u + P_v) = P_v P_u + P_v P_u = 0 + P_v = P_v,$$

maka $P_u + P_v = I$ identitas pada aljabar-$C^*C^*(S,P)$.

Selanjutnya, pandang $S_e + S_f \in C^*(S,P)$,

$$(S_e + S_f)^*(S_e + S_f) = S_e^*S_e + S_e^*S_f + S_f^*S_e + S_f^*S_f = P_u + P_v = I$$

maka $S_e + S_f$ merupakan isometri di $C^*(S,P)$. Perhatikan pula

$$S_e = (S_e + S_f)S_e^*S_e = (S_e + S_f)P_u$$
$$S_f = (S_e + S_f)S_f^*S_f = (S_e + S_f)P_v$$
$$(S_e + S_f)(S_e + S_f)^* = S_eS_e^* + S_eS_f^* + S_fS_e^* + S_fS_f^* = S_eS_e^* + S_fS_f^* = P_v$$
$$P_u = I - P_v = (S_e + S_f)^*(S_e + S_f) - (S_e + S_f)(S_e + S_f)^*$$

maka $(S_e + S_f)$ merupakan pembangun dari C*(S,P).

Hasil $(S_e + S_f)(S_e + S_f)^* = P_v$ mengakibatkan $S_e + S_f$ merupakan isometri non uniter jika dipilih $P_v \neq 0$. Di sisi lain, Murphy (1990) pada Teorema Coburn menyatakan bahwa, "*semua aljabar-C* yang dibangun oleh sebuah isometri non uniter akan isomorfik dengan aljabar Toeplitz* $\mathcal{T}$ *, yakni aljabar-C* yang dibangun oleh unilateral shift.*" Dengan demikian, $C^*(S,P) \cong \mathcal{T}$.

Dari hasil ini, aljabar Toeplitz akan memiliki padanan dengan graf yang memiliki dua simpul yang terhubung oleh sebuah panah dengan simpul ujung memiliki sebuah *loop*. Ini sesuai dengan Teorema 2.2.7. Dalam hal ini graf pada Contoh 2.2.8 tidaklah isomorfik dengan $\oplus_{i=1}^{n} M_{\left|s^{-1}(v_i)\right|}(\mathbb{C})$ dikarenakan memuat siklus, yaitu sebuah *loop*.

3. Representasi Tunggal Aljabar-C* dari Graf Baris-Berhingga

Contoh 2.1.2 mengindikasikan bahwa sebuah graf akan membentuk keluarga Cuntz-Krieger tertentu bergantung pada pemilihan ruang Hilbert. Artinya, belum tentu keluarga Cuntz-Krieger yang dibentuk akan tunggal sehingga akan berakibat pada hasil aljabar-C^* yang belum tentu tunggal pula.

Perhatikan hasil pada Contoh 2.2.6 dan generalisasinya pada Teorema 2.2.7 serta hasil pada Contoh 2.2.8 yang dalam hal ini tidak ada pemilihan ruang Hilbert terlebih dahulu melainkan melalui komposisi isometri-isometri pada setiap lintasan dari suatu graf baris-berhingga. Hasil-hasil tersebut menggambarkan bahwa sebuah graf memberikan suatu aljabar-C^* umum yang akan isomorfik dengan suatu aljabar-C^* tertentu. Hasil ini juga memberikan indikasi bahwa representasi aljabar-C^* dari graf baris-berhingga dapat menjadi universal (Szymanski, 2002)

Selanjutnya akan dibentuk keuniversalan aljabar-C^* yang dibangun oleh suatu keluarga Cuntz-Krieger dari suatu graf E. Misalkan $V = \text{span}\left\{d_{\mu,\alpha} : \mu,\alpha \in E^*, s(\mu) = s(\alpha)\right\}$. Operasi pada didefinisikan sebagai kombinasi linier berhingga

$$a\left(\sum_{\mu,\alpha\in E^*} z_{\mu,\alpha} d_{\mu,\alpha}\right) + a\left(\sum_{\mu,\alpha\in E^*} w_{\mu,\alpha} d_{\mu,\alpha}\right) = \sum_{\mu,\alpha\in E^*} \left(az_{\mu,\alpha} + bw_{\mu,\alpha}\right) d_{\mu,\alpha}$$

untuk setiap $a, b, z_{\mu,\alpha}, w_{\mu,\alpha}$ sebarang skalar.

Kemudian dengan $\left(d_{\mu,\alpha}\right)^* = d_{\alpha,\mu}$ dan

$$d_{\mu,\nu} \cdot d_{\alpha,\beta} = \begin{cases} d_{\mu\alpha',\beta} & \text{jika } \alpha = \nu\alpha',\ \exists\alpha' \in E^* \\ d_{\mu,\beta\nu'} & \text{jika } \nu = \alpha\nu',\ \exists\alpha' \in E^* \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases}$$

dapat ditunjukkan bahwa V merupakan aljabar-*.

Berdasarkan Akibat 2.2.4, untuk setiap keluarga Cuntz-Krieger $\{S,P\}$ pada ruang Hilbert H, $\left\{S_\mu S_\alpha^*\right\}$, memenuhi $\left\{d_{\mu,\alpha}\right\}$ sehingga terdapat representasi $\pi_{S,P} : V \to B(H)$ dengan $\pi_{S,P}\left(d_{\mu,\alpha}\right) = S_\mu S_\alpha^*$. Perhatikan untuk setiap proyeksi taknol P, jika $\|P\|^2 = \|P^*P\| = \|P\|$ maka $\|P\| = 1$. . Karena untuk setiap isometri parsial S, S^*S, merupakan proyeksi ortogonal, diperoleh $\|S\|^2 = \|S^*S\| = 1$. Dengan demikian,

$$\left\|\pi_{S,P}\left(\sum_{\mu,\alpha\in E^*} z_{\mu,\alpha} d_{\mu,\alpha}\right)\right\| \le \sum_{\mu,\alpha\in E^*} \left|z_{\mu,\alpha}\right| \left\|S_\mu S_\alpha^*\right\| \le \sum_{\mu,\alpha\in E^*} \left|z_{\mu,\alpha}\right|.$$

Karena jumlahan ini berhingga artinya norm dari representasi tersebut terbatas yang artinya untuk setiap $v \in V, \|v\|_1 = \sup\left\{\left\|\pi_{S,P}(v)\right\|\right\}$, mendefinisikan sebuah seminorm yang memenuhi $\|v * v\|_1 = \left(\|v\|_1\right)^2$.

Selanjutnya misalkan $I = \left\{x \in V : \|x\|_1 = 0\right\}$, maka dapat ditunjukkan bahwa *I* adalah ideal-* bagi *V* (Brown, Fuller, Pitts, & Reznikoff, 2022). Akibatnya, $V_0 = V / I$ merupakan aljabar-* dengan norm kuosien $\|v + I\|_0 = \inf\left\{\|v + x\|_1 : x \in I\right\}$. Dengan norm ini, *closure* dari V_0 lengkap yang artinya $\overline{V_0}$ adalah aljabar-*C**. Dengan norm ini pula $\pi_{S,P}$ kontinu sehingga $\overline{V_0}$ tunggal. Hasil ini akan digunakan sebagai dasar aljabar-*C** yang universal.

Teorema 2.3.1 (Raeburn, 2005)
Untuk sebarang graf baris-berhingga *E*, terdapat suatu aljabar-*C*C**(*S,P*) yang dibangun oleh keluarga Cuntz-Krieger *E*{*S,P*} sehingga untuk setiap keluarga *Cuntz-Krieger E*{*T,Q*} dari suatu aljabar-*C**, terdapat homomorfisma $\pi_{T,Q} : C^*(S,P) \to B$ dengan $\pi_{T,Q}(S_e) = T_e, \forall e \in E^1$ dan $\pi_{T,Q}(P_v) = Q_v, \forall v \in E^0$.

Bukti.
Berdasarkan hasil pada pembahasan sebelumnya, $\overline{V_0}$ isomorfik dengan aljabar-*C** suatu keluarga Cuntz-Krieger *E*{*S,P*} dari graf baris-berhingga *E*. Pilih $C^*(S,P) = \overline{V_0}$ dengan isometri parsial $S_e = S_e P_{s(e)} = S_e S^*_{s(e)} = d_{e,\,s(e)}$ dan proyeksi ortogonal $P_v = S_v S^*_v = d_{v,v}$. Untuk aljabar-*C*B* dengan keluarga Cuntz-Krieger *E*{*T,Q*}. Definisikan $\rho : B \to B(H)$ dengan $\rho(T) = S$ dan $\rho(Q) = P$, maka dapat dipilih $\pi_{T,Q} = \left(\rho^{-1} \mid C^*(S,P)\right) \circ \pi_{\rho(T),\rho(Q)}$ sebagai homomorfisma *C**(*S,P*) ke *B*.

■

Akibat 2.3.2 (Raeburn, 2005)
Misalkan E adalah graf baris-berhingga *E* dan *C* adalah aljabar-*C** yang dibangun oleh keluarga *Cuntz-Krieger E*{*W,R*}

sehingga untuk setiap keluarga *Cuntz-Krieger* $E\{T,Q\}$ dari suatu aljabar-*C*B*, terdapat *homomorfisma* $\rho_{T,Q}:C\to B$ di mana $\rho_{T,Q}(W_e)=T_e, \forall e\in E^1$ dan $\rho_{T,Q}(R_v)=Q_v, \forall v\in E^0$. Maka terdapat suatu *isomorfisma* ϕ dari *C*(S,P)* pada *C* sehingga $\phi(S_e)=W_e=\forall e\in E^1$ dan $\phi(P_v)=R_v, \forall e\in E^0$.

Bukti.

Pilih $\phi=\pi_{w,r}$. Karena daerah hasil dari pemetaan ini memuat $\{w_e,r_v\}$ yang merupakan basis untuk *C*, diperoleh ϕ surjektif di C. Kemudian jika $\phi(a)=0$ maka $\pi_{w,r}(a)=0$. Akibatnya $a=\rho_{S,P}(\pi_{w,r}(a))=\rho_{S,P}(0)=0$ yang artinya ϕ injektif. Jadi, $C^*(E)\cong C$.

■

Dari teorema dan akibat di atas, diperoleh kesimpulan bahwa untuk sebarang graf baris-berhingga *E*, dua sebarang aljabar-*C** yakni *C*(S,P)* dan *C* akan isomorfik meskipun memiliki keluarga Cuntz-Krieger yang berbeda. Hasil ini menunjukkan bahwa bagaimanapun keluarga Cuntz-Krieger yang dibentuk dari suatu graf E, akan membentuk aljabar-*C** yang universal.

KESIMPULAN

Suatu graf baris-berhingga *E* dapat direpresentasikan menjadi aljabar-*C** melalui keluarga Cuntz-Krieger *E{S,P}*, dengan setiap simpul $v\in E^0$ membentuk himpunan proyeksi ortogonal $\{P_v\}$ dan setiap panah membentuk himpunan isometri parsial $\{S_e\}$ dan memenuhi relasi Cuntz-Krieger: $S_e^*S_e=P_{s(e)}, \forall e\in E^1;$ dan $P_v=\sum_{\{e\in E^1:r(e)=v\}}S_eS_e^*,$, dengan *v* bukan simpul sumber.

Aljabar-*C** yang dibentuk dari graf baris-berhingga *E*, dinotasikan *C*(S,P)*, dibangun oleh keluarga *Cuntz-Krieger* *E{S,P}*. Lebih lanjut, didasarkan pada *E**, himpunan semua lintasan

dari *E*, aljabar-C $C^*(S,P)$ dapat dibangun oleh semua bentuk $S_\mu S_\alpha^*$, komposisi isometri parsial lintasan μ dan α, yakni $C^*(S,P) = \overline{span}\{S_\mu S_\alpha^* : \mu,\alpha \in E^*\}$.

Untuk sebarang graf baris-berhingga *E*, terdapat aljabar-*C*C**(*E*) yang dibangun oleh {*S,P*} sehingga jika untuk setiap keluarga Cuntz-Krieger E{T,Q| dari suatu aljabar-*C*B* terdapat homomorfisma dari *C* ke *B* dengan *C* adalah aljabar-*C** yang dibangun oleh {*W,R*}, maka *C* isomorfik dengan *C**(*E*). Hasil ini menunjukkan bahwa bagaimanapun keluarga Cuntz-Krieger yang dibentuk dari suatu graf *E*, akan membentuk aljabar-*C** yang universal. Dengan demikian, representasi aljabar-*C** melalui graf baris berhingga akan tunggal yang akan memberikan manfaat dalam menggambarkan aljabar-*C** tidak hanya secara abstrak namun berupa ilustrasi gambar.

Representasi aljabar-*C** melalui graf memiliki klasifikasi geometri yang dapat dipelajari pada Sørensen (2013) yang membahas tentang klasifikasi geometri dari aljabar-*C** pada graf sederhana dan juga pada Eilers, Restorff, Ruiz, & Sørensen (2018) yang membahas tentang klasifikasi geometri dari aljabar-*C** pada graf berhingga.

DAFTAR PUSTAKA

Bates, T., Pask, D., Raeburn, I. & Szymanski, W (2000). The *C**-algebras of row-finite graphs, *New York J. Math*. 6 (2000), 307-324

Brown, J. H., Fuller, A. H., Pitts, D. R., & Reznikoff, S. A. (2022). Regular ideals of graph algebras. *Rocky Mountain J. Math*. 52 (2022), 43-48. DOI: https://doi.org/10.1216/rmj.2022.52.43

Brownhole, N. (2022). Introduction to KMS States. *CIMPA Research School "Noncommutative geometry and applications to quantum physics"*, July 12-22, Quy Nhon: Vietnam.

Cartlidge, E. (2010). *Quantum mechanics boosts photosynthesis*. Physics World. Retrieved from https://physicsworld.com/a/quantum-mechanics-boosts-photosynthesis/ 2020-12-12

Conway, J.B. (2000). *A Course in Operator Theory*. Rhode Island: American Mathematical Society.

Eilers, S., Restorff, G., Ruiz, E., & Sørensen, A.P. (2018). Geometric classification of graph *C**-algebras over finite graphs. *Canad. J. Math.* 70 (2018), no. 2, 294–353. DOI: http://dx.doi.org/10.4153/CJM-2017-016-7

Hines, P. & Braunstein, S.L. (2008). *The Structure of Partial Isometries I.* Retrieved from http://www.peterhines.net/Site/DOWNLOADS_files/draftIsom.pdf

Huef, A. an, Laca, M., Raeburn, I., & Sims, A. (2013). KMS States on the *C**-algebras of finite graphs. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 405 (2013), 388–399.

IBM (2017). *Applications of Quantum Computing*. Retrieved from https://research.ibm.com/quantum-computing 28 June 2017

Ian, F. (2019). *Lecture notes on C*-algebras*. Retrieved from https://www.math.uvic.ca/faculty/putnam/ln/C*-algebras.pdf

MacCluer, B.D. (2009). *Elementary Functional Analysis*. New York: Springer.

Murphy, G.J. (1990). *C*-Algebras and Operator Theory*. San Diego: Academic Press.

Raeburn, I. (2005). Graph algebras. *CBMS Regional Conference Series in Mathematics, 103, Published for the Conference Board of the Mathematical Sciences*. Washington DC: the American Mathematical Society ISBN: 0-8218-3660-9. DOI: http://dx.doi.org/10.1090/cbms/103

Rudin, W. (1987). *Real and Complex Analysis*. Singapura: McGraw-Hill Book.

Schmidt, S. & Weber, M. (2017). Quantum Symmetries of Graph C*-Algebras. *Canadian Mathematical Bulletin*, 61(4), 848 – 864. DOI: https://doi.org/10.4153/CMB-2017-075-4

Schneier, B. (1993). *Applied Cryptography (2nd ed.)*. Wiley. p. 554. ISBN 978-0471117094Sørensen, A.P.W. (2013). Geometric classification of simple graph algebras. *Ergodic Theory Dynam. Systems,* 33 (2013), 1199–1220. DOI: http://dx.doi.org/10.1017/S0143385712000260

Szymanski, W. (2002). General Cuntz-Krieger uniqueness theorem. *Internat. J. Math.* 13 (2002), 549–555. DOI: http://dx.doi.org/10.1142/S0129167X0200137X

SURVEI PERSEPSI MINAT CALON MAHASISWA TERHADAP PROGRAM STUDI MANAJEMEN INFORMASI KESEHATAN DI UNIVERSITAS TERBUKA

SURVEY ON THE PERCEPTIONS OF PROSPECTIVE STUDENTS' INTENTIONS OF HEALTH INFORMATION MANAGEMENT STUDY PROGRAM BY UNIVERSITAS TERBUKA

Deddy Ahmad Suhardi[1*], Sri Yuniati Putri Koes Hardini[2], Heny Kurniawati[3], Mutimanda Dwisatyadini[3], Sri Utami[3], Fawzi Rahmadiyan Zuhairi[3]

[1]Program Studi Statistika, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
[2]Program Studi Agribisnis, Jurusan Pertanian, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
[3]Program Studi Biologi, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

*deddy_as@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Universitas Terbuka (UT) terus berupaya meningkatkan peran dan reputasinya, melalui pembukaan program studi baru untuk memenuhi kebutuhan tenaga kerja pendidikan tinggi. Survei ini bertujuan untuk mengidentifikasi prospek minat calon mahasiswa terhadap program studi (PS) Manajemen Informasi Kesehatan (MIK) yang akan diselenggarakan dengan sistem pendidikan jarak jauh (PJJ) di UT. Instrumen survei menggunakan 13 pertanyaan yang berkaitan dengan empat faktor peminatan kepada PS, dan 15 pertanyaan lainnya yang berkaitan dengan empat faktor peminatan kepada PS dengan sistem PJJ. Survei dilakukan oleh Fakultas Sains dan Teknologi UT pada bulan April-November 2021 kepada 800 orang lulusan atau pelajar sekolah menegah umum/kejuruan/sederajat di 18 provinsi. Data dianalisis secara deskriptif dan kuantitatif eksploratif menggunakan multiple correspondence analysis (MCA) terhadap 553 orang partisipan yang sudah mengenal program studi MIK. Hasil analisis data menunjukkan tingkat persepsi partisipan satu

dengan lainnya dikarakterisasi oleh dimensi tingkat minat (Dim 1) dan tingkat resistensi (Dim 2) mereka kepada PS MIK sistem PJJ (total variabilitas 29.5%). Prospek minat calon mahasiswa kepada PS MIK-PJJ teridentifikasi berhubungan dengan faktor keunggulan dan daya saing program studi ini, serta faktor sosial, ekonomi, demografi dan geografis calon mahasiswa.

Kata Kunci: *manajemen informasi kesehatan, multiple correspondence analysis (MCA), prospek minat, survei persepsi, tingkat minat, tingkat resistensi*

ABSTRACT

The Open University (UT) continues to strive to improve its role and reputation, through the opening of new study programs to meet the needs of a higher education workforce. The aim of this survei was to identify the prospective students' intension on the Health Information Management (HIM) study program would be run as a distance education (DE) study program. The instrument of the survei was constructed by a set of 13 variables related to four dimensions of participants' intention of study program, and one another set of 15 the variables related to four dimensions of their intention to DE study program. The survey was conducted by the Faculty of Science and Technology in April-November 2021 to 800 graduates or students of high schools in 18 provinces. Data were analyzed descriptively and quantitatively exploratory using multiple correspondence analysis on 553 participants who were familiar with the HIM study program. The results showed that the level of perception of participants was characterized by the dimensions of the level of intentions (Dim 1) and the level of resistance (Dim 2) on the HIM-DE study program (total variability 29.5%). The prospects of students' intentions of the HIM-DE study program were identified related to the factors of advantages and competitiveness of this study program, as well as the conditions of their social, economic, demographic and geographic factors.

Keywords: *health information management, multiple correspondence analysis (MCA), prospect of interest, perception survey, level of interest, level of resistance*

PENDAHULUAN

Institusi pendidikan tinggi semakin diharapkan untuk melayani mahasiswa dalam jumlah yang besar dan juga untuk memenuhi kebutuhan masyarakat industri dengan memberikan pelatihan dan keterampilan yang dibutuhkan (de Boer et al., 2002; Youssef, 2014). Persepsi masyarakat kepada perguruan tinggi, diantaranya, tergantung pada jumlah program studi yang ditawarkan dan jumlah mahasiswa (Sladek, 2014). Sebagai perguruan tinggi negeri terbuka dan jarak jauh, Universitas Terbuka (UT) yang mendapat tugas dari pemerintah untuk meningkatkan daya tampung pendidikan tinggi negeri (UT, 2020), berupaya meningkatkan peran dan reputasinya dengan terus memperluas akses, daya tampung, jumlah mahasiswa, dan jumlah lulusan untuk dapat memenuhi kebutuhan tenaga kerja pendidikan tinggi.

Pada level fakultas, strategi pencapaian sasaran ini, diantaranya diimplementasi dengan mengembangkan program studi baru S1 atau vokasi, dengan melakukan studi kelayakan untuk terselenggaranya program studi baru. Salah satu program studi (PS) yang dikaji pada tahun 2021 untuk dibuka adalah Manajemen Informasi Kesehatan (MIK) di lingkungan Fakultas Sains dan Teknologi (FST) UT.

Kebutuhan masyarakat akan lulusan bidang studi MIK dipandang tinggi sesuai dengan perkembangan era digitalisasi dan tata kelola informasi dalam ekosistem pelayanan kesehatan (Hatta, 2016; Meinke, 2020; Indeed, 2021). Luaran pendidikan MIK dapat berkontribusi pada pemenuhan kebutuhan masyarakat terhadap profesi MIK sebagai analis data pelayanan kesehatan. Kompetensi ini didukung oleh bidang-bidang ilmu: matematika, statistika, sistem informasi, biologi, manajemen, administrasi elektronik pelayanan kesehatan, serta komunikasi dan interpersonal skills. Deskripsi pekerjaan profesi MIK adalah mengumpulkan, menganalisis, dan menghasilkan data untuk menyajikan informasi yang bernilai kepada *stakeholder* tentang keadaan dan *trend* yang terjadi dalam kesehatan individu maupun masyarakat (AHIMA-GHWC, 2015).

Profesi MIK merupakan satu dari tiga profesi informasi kesehatan – MIK, Informatika Kesehatan, dan Teknologi Informasi dan Komunikasi Kesehatan. Profesi MIK fokus kepada penyediaan, analisis, dan perlindungan informasi kesehatan, yang diperlukan untuk: meningkatkan kualitas, keamanan, privasi, dan efisiensi pelayanan kesehatan. MIK berfungsi sebagai jembatan yang menghubungkan fungsi klinis, operasional, dan administratif dalam sistem pelayanan kesehatan (AHIMA-GHWC, 2015). Dengan demikian, MIK merupakan praktik untuk mendapatkan, menganalisis, memproteksi digitalisasi data dan informasi medis yang penting bagi kualitas pelayanan pasien (Hatta, 2016).

Profesional MIK memungkinkan dokter dan profesional perawatan kesehatan lainnya untuk tetap memutakhirkan informasi pasien dengan mengambil dan secara akurat menyimpan informasi ini. Lapangan kerja/karir profesional MIK diantaranya adalah manajer informasi kesehatan, *medical coder*, analis data kesehatan, auditor kepatuhan pengkodean rawat jalan, spesialis dokumentasi klinis, manajer sistem klinis, analis riset medis, koordinator informasi pasien, teknisi informasi kesehatan, dan analis klaim asuransi (Meinke, 2020; Indeed, 2021).

Studi kelayakan secara umum dilakukan untuk mendapatkan gambaran paling dekat suatu proyek investasi yang direncanakan dengan kemungkinan realisasinya dan mendapatkan prospek proyek berjalan dengan baik (Mesly, 2017; Loch, DeMeyer, & Pich, 2011). Studi kelayakan biasanya dilakukan dalam tiga fase: perumusan ide awal, studi kelayakan pendahuluan, dan studi kelayakan untuk mendukung keputusan akhir (Nobelius & Trygg, 2002). Penilaian kelayakan awal tidak boleh terlalu kaku (Samset & Volden, 2016), karena dapat merusak tahap awal proyek yang sangat inovatif. Aspek-aspek tertentu dari hasil studi awal dapat menjadi penting untuk menemukan opsi yang layak (Lenfle, 2014).

Studi kelayakan pendahuluan bertujuan menentukan apakah studi perlu dilanjutkan lebih mendalam dan membantu cara yang tepat menganalisis pasar, kelayakan teknis, dan biaya investasi (McLeod, 2021; Mesly, 2017). Lima kerangka kerja dibuat dalam studi kelayakan pendahuluan, yaitu: kerangka definisi, kerangka kontekstual risiko, potensi proyek, parameter proyek, faktor keberhasilan, dan kegagalan kunci (Mesly, 2017). Pertimbangan pasar saat ini menjadi salah satu yang paling

pokok dalam studi kelayakan pendahuluan PS MIK ini, berkaitan dengan tingkat peminatan, pangsa pasar, hubungan program studi dengan kebutuhan masyarakat, tingkat persaingan, dan perencanaan sistem promosi.

Survei persepsi peminatan PS MIK ini merupakan bagian dari studi kelayakan pendahuluan untuk mengetahui potensi dan prospek peminatan program studi ini jika diselenggarakan dengan sistem PJJ UT, serta menemukan karakteristik peminatan calon mahasiswa kepada PS MIK sistem PJJ. Untuk memperoleh gambaran tersebut, perlu dikaji bagaimanakah persepsi dan tingkat minat partisipan terhadap PS MIK sistem PJJ, serta aspek-aspek apakah yang menjadi karakteristik perbedaan tingkat minat partisipan satu dengan lainnya. Kedua hal tersebut sangat berpengaruh bukan saja terhadap prospek kuantitas pendaftar program studi ini, tetapi juga terhadap sistem pemasaran (Kalenskaya, Gafurov, & Novenkova, 2013), kerja sama, desain penyelenggaraan program, dan kesuksesan studi mahasiswa.

Studi kelayakan pendahuluan ini bertumpu pada hasil survei persepsi minat calon mahasiswa kepada program studi MIK dengan sistem PJJ. Teknis analisis data hasil survei ini menjadi sangat menentukan untuk dapat menampilkan wawasan (*insight*) yang sangat penting mengenai karakteristik peminatan calon mahasiswa dari hasil survei ini. Dalam paper ini, disajikan bagaimana penggunaan salah satu teknik analisis statistika, yaitu teknik *Multiple Correspondence Analysis* (MCA) dapat digunakan untuk kebutuhan ini. Dengan teknik ini diperoleh gambaran (*mapping*) karakteristik potensial peminat program studi yang penting untuk mengembangkan inovasi dalam strategi pelaksanaan dan pemasaran program studi.

METODE

Sampel survei adalah calon potensial mahasiswa program studi dengan pendidikan awal sekolah menengah umum dan kejuruan atau sederajat (SMU/K), mahasiswa, atau lulusan jenjang diploma. Teknik pengambilan sampel dilakukan dengan purposive sampling dari 18 provinsi di 25 wilayah Unit Program Belajar Jarak Jauh (UPBJJ) UT. Jumlah partisipan valid dalam survei ini adalah mereka yang menjawab lengkap seluruh pertanyaan dalam instrumen survei.

Instrumen survei dikembangkan berdasarkan pendekatan *brand knowledge* dan prospek program studi dengan sistem PJJ (Tabel 1). Dimensi persepsi minat kepada program studi terdiri atas: pengenalan kepada program studi (*brand awareness*), sikap positif (*attitude*), persepsi terhadap kualitas dan layanan (*perception*), dan minat studi (*intention*). Dimensi prospek untuk PJJ terdiri atas: akses, keterampilan dan literasi TIK (Teknologi Informasi dan Komunikasi), faktor pendukung lingkungan untuk PJJ, literasi PJJ, dan prospek minat studi dengan sistem PJJ (Susilo, Darojat, & Suhardi, 2019). Instrumen terdiri atas 8 variabel laten (faktor/dimensi) dan 28 variabel indikator dalam bentuk pertanyaan tertutup dengan opsi jawaban skala kategorik: Sangat setuju (*Ss*), Setuju (*S*), Tidak setuju (*Ts*), dan Sangat tidak setuju (*Sts*).

Analisis data deskriptif menggunakan distribusi frekuensi masing-masing variabel. Analisis reliabilitas instrumen menggunakan koefisien konsistensi internal alpha Cronbach dihitung dengan menjalankan prosedur *optimal scaling* pada SPSS (*Statistical Package for Social Science*). Analisis data selanjutnya, secara kuantitatif-eksploratif menggunakan *multiple correspondence analysis* (MCA), untuk mengkarakterisasi partisipan pada berbagai kategori aspek-aspek dalam instrumen.

Tabel 1. Dimensi dan Variabel Instrumen Survei

Kode 1	Variabel Laten/ Dimensi	Definisi Operasional	Kode 2	Variabel Indikator	Sumber
A	Brand Awareness	Tingkat pengetahuan, pengenalan, ingatan, dan pemahaman partisipan	A1 A2 A3 A4	Recognition Memorable Recall Notice	Coyle (2022); Malik et al. (2013)

Kode 1	Variabel Laten/ Dimensi	Definisi Operasional	Kode 2	Variabel Indikator	Sumber
B	Consumer attitude	Tingkat kemampuan partisipan untuk mengidentifikasi sebuah merek	B1 B2 B3 B4	Utilitarian Ego defensive Value expressive Knowledge	Delafrooz, Paim, & Khatibi, (2009); Solomon, Russell-Bennett, & Previte, (2012);
C	Consumer perception	Sudut pandang partisipan terhadap harga, kualitas, dan pelayanan produk	C1 C2	Quality Product services	Grunert (2005)
D	Intensi/Minat	Niat partisipan untuk kuliah di PS	D1 D2 D3	Positive toward Desire Idea	Lee & Lee (2015)
E	Akses, Literasi, dan Keterampilan TIK	Kondisi/ pandangan individual partisipan terhadap ketersediaan akses, pemanfaatan, dan kemampuan TIK	E1 E2 E3 E4	Akses sarana komputer Akses internet Literasi teknologi Keterampilan aplikasi	Susilo, Darojat, & Suhardi (2019)
F	Faktor Pendukung PJJ	Penilaian partisipan terhadap kondisi faktor lingkungan pendukung untuk mengikuti PJJ	F1 F2 F3 F4	Kebijakan pemerintah Layanan internet Infrastruktur Harga sarana	Susilo, Darojat, & Suhardi (2019)

Kode 1	Variabel Laten/ Dimensi	Definisi Operasional	Kode 2	Variabel Indikator	Sumber
G	Literasi PJJ	Pandangan/ ekspektasi partisipan terhadap manfaat dan motivasi dalam PJJ	G1 G2 G3 G4	Fleksibilitas Efektivitas Interaksi Umpan balik	Susilo, Darojat, & Suhardi (2019); Suhardi, Susilo, Priyanto, & Abdi (2021)
H	Prospek PS dengan Sistem PJJ	Penilaian partisipan terhadap kesempatan adanya PS MIK dengan sistem PJJ	H1 H2 H3	Services Positive toward Price	Grunert (2005), Lee & Lee (2015)

MCA merupakan teknik multivariat dalam statistika untuk analisis tabel-tabel yang terdiri dari sejumlah kelompok variabel kategori dari pengamatan individu-individu (Husson & Pagès, 2017). MCA mampu mengkarakterisasi kelompok individu-individu, meringkas hubungan antar variabel ke dalam beberapa variabel sintesis (dimensi), dan mempelajari karakteristik respon kategori-kategori variabel. MCA lebih difokuskan terutama terhadap studi kategori, karena kategori mewakili variabel dan sekelompok individu (semua individu yang memilih kategori ini). Kelayakan hasil analisis MCA dapat dilihat dari tiga hal: (i) persentase variabilitas dimensi-dimensi utama, (ii) tingkat kontribusi dan representasi dari kategori dan individu terhadap dimensi-dimensi, dan (iii) penjelasan dimensi-dimensi utama oleh semua variabel aktif maupun variabel tambahan (deskriptif). Hasil MCA disajikan secara visual dalam bentuk plot proyeksi posisi setiap variabel, kategori-variabel, dan individu dalam sebuah bidang datar dua dimensi pertama yang memiliki persentase variabilitas terbesar. Prosedur MCA ini dilakukan dengan menggunakan software R paket FactoMineR (Husson, Josse, Lê, & Mazet, 2017).

PEMBAHASAN

1. Profil Partisipan

Jumlah partisipan valid adalah 720 orang (90% dari target 800 partisipan), yang berada di 18 provinsi. Partisipan yang menjawab sudah *mengenal* program studi MIK adalah 553 orang (76.8 % dari 720 partisipan). Profil distribusi partisipan ini berdasarkan provinsi, wilayah tinggal, jenis kelamin, usia, dan status pendidikannya saat survei, disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Profil Partisipan yang Mengenal Program Studi MIK

No	Provinsi	N	Wilayah		Jenis Kelamin		Usia (tahun)				Status Pendidikan		
			Desa	Kota	L	P	≤17	18	19	≥20	SMU3	SMUK	MHS
1	Kaltim	93	53	40	26	67	44	40	6	3	24	39	30
2	Sumut	64	21	43	28	36	26	31	5	2	1	43	20
3	Kaltara	63	12	51	10	53	24	25	11	3	11	39	13
4	Riau	52	10	42	18	34	9	28	10	5		29	23
5	Jateng	48	42	6	9	39	39	7	1	1	14	17	17
6	Papua	40	3	37	16	24	24	14	1	1	1	26	13
7	Sulsel	28	12	16	5	23	15	6	3	4	7	6	15
8	Sulbar	20	9	11	8	12	4	2	3	11	1	4	15
9	Jambi	19	1	18	8	11	7	7	4	1		11	8
10	Kalsel	18		18	7	11	5	13				13	5
11	Jabar	17	3	14	3	14	9	6		2	1	9	7
12	NTB	17	10	7	6	11	8	7	2		2	11	4
13	Sulteng	16	7	9	7	9	2	7	4	3	1	7	8
14	Bali	13	7	6	5	8	4	8	1			8	5
15	Jatim	13	7	6	7	6	0	1	5	7		1	12
16	Gorontalo	11	11		1	10	8	2	1		3	4	4
17	Papbar	11		11	3	8	4	6	1			11	
18	Jakarta	10		10	2	8	1	9				7	3
	Total	**553**	**208**	**345**	**169**	**384**	**233**	**219**	**58**	**43**	**66**	**285**	**202**
	Persentase (%)	***100***	***37.6***	***62.4***	***30.6***	***69.4***	***42.1***	***39.6***	***10.5***	***7.8***	***11.9***	***51.5***	***36.5***

Keterangan: *L*, Laki-laki; *P*, Perempuan; *SMU3*, Pelajar SMU Kelas III; *SMUK*, Lulusan SMU/K; *MHS*, Lulusan SMU/K status mahasiswa diploma/sarjana.

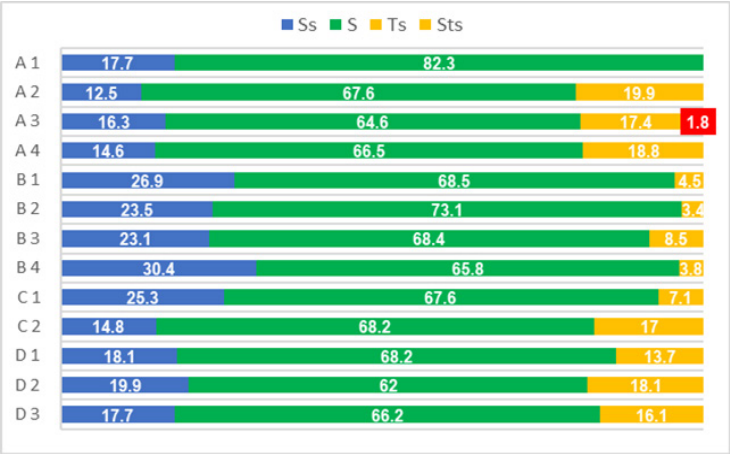
Distribusi partisipan menurut provinsi didominasi oleh provinsi luar Jawa (81.7%), yaitu tiga provinsi di Kalimantan (31.5%), tiga provinsi di Sumatera (24.4%), empat provinsi di Sulawesi (13.6%), dan 12.3% dari tiga provinsi: Nusa Tenggara Barat, Papua, dan Papua Barat. Selainnya, 18.3% partisipan berasal dari lima provinsi di Jawa dan Bali. Distribusi partisipan menurut wilayah tempat tinggal, partisipan lebih banyak yang tinggal di wilayah perkotaan (62.4%). Partisipan wilayah perkotaan ini umumnya berada di sembilan provinsi (Kaltara, Kalsel, Sumut, Riau, Jambi, Jabar, Jakarta, Papua, dan Papbar). Sedangkan partisipan wilayah pedesaan umumnya berada di empat provinsi (Kaltim, Jateng, NTB, dan Gorontalo).

Distribusi partisipan menurut jenis kelamin, partisipan sebagian besar adalah perempuan (69.4%), dan komposisi ini relatif sama di setiap provinsi. Sementara itu, distribusi partisipan menurut usia, partisipan didominasi usia 18 tahun atau di bawahnya (81.7%). Partisipan kelompok usia ini berada di hampir semua provinsi, kecuali di Sulbar dan Jatim (lebih banyak berusia 20 tahun atau lebih). Mereka ini umumnya adalah tamatan baru (*fresh graduate*) atau yang masih duduk di bangku kelas III SMU/K/sederajat. Hal ini terlihat dari distribusi status pendidikan partisipan saat ini yang didominasi oleh kelompok status pendidikan tersebut. Selainnya, 36.5% partisipan adalah mereka lulusan SMU/K/sederajat yang berstatus mahasiswa diploma/ sarjana, yang berada di tiga provinsi yaitu: Sulsel, Sulbar, dan Jatim.

2. Tingkat Persepsi dan Minat kepada PS MIK

Distribusi frekuensi variabel-variabel peminatan partisipan kepada PS MIK disajikan pada Gambar 1 (N = 553). Pada aspek pengenalan PS (*brand awareness*), variabel A1-A4, partisipan telah memiliki tingkat preferensi yang tinggi. Sekitar 80% atau lebih, partisipan mampu mengingat (*memorable*), mengingat kembali (*recall*), dan memperhatikan informasi (*notice*) PS ini. Ini berarti bahwa *pengaruh media* telah cukup kuat membentuk *brand awareness* PS ini, dan menjadi indikasi bahwa PS MIK *dapat bersaing* dengan kompetitor dari PS lainnya. Namun demikian, masih sekitar 20% partisipan yang masih belum tertarik dengan PS ini sehingga tidak memperhatikan atau bahkan tidak mengingat PS ini ketika ingin melanjutkan studinya.

Penyelenggara PS ini perlu mengembangkan media untuk promosi dan edukasi yang tepat kepada masyarakat tentang keunggulan dan prospek PS ini.



Keterangan: *Ss*, Sangat setuju; *S*, Setuju; *Ts*, Tidak setuju; *Sts*, Sangat tidak setuju; *A1*, Recognition; *A2*, Memorable; *A3*, Recall; *A4*, Notice; *B1*, Utilitarian; *B2*, Ego defensive; *B3*, Value expressive; *B4*, Knowledge; *C1*, Quality; *C2*, Product services; *D1*, Positive toward; *D2*, Desire; *D3*, Idea.

Gambar 1. Distribusi Frekuensi Aspek-aspek Minat PS MIK

Sikap positif (*brand attitude*) partisipan merupakan tingkat kemampuan partisipan untuk mengidentifikasi merek (Delafrooz, Paim, & Khatibi,2009; Solomon, Russell-Bennett, & Previte, 2012). Dalam hal ini empat dimensi fungsi sikap pelanggan terhadap "*brand* organisasi" meliputi: fungsi pengembangan diri (*utilitarian*), aktualisasi diri (*ego defensive*), gaya/trend (*value expresive*), dan keingintahuan (*knowledge*).

Sikap positif partisipan terhadap PS MIK (variabel B1-B4) mempunyai tingkat preferensi tinggi (95% atau lebih) berkaitan dengan fungsi aktualisasi diri, keingintahuan, pengembangan diri, dan gaya/trend di masyarakat. Partisipan dalam survei ini memiliki ego defensive, knowledge, dan utilitarian yang tinggi

(Suhardi, Susilo, Priyanto, & Abdi, 2021). Dengan demikian, PS MIK telah dipandang sebagai: (i) PS yang dapat meningkatkan citra diri/aktualisasi diri; (ii) PS yang bisa memenuhi keingintahuan keilmuan peserta didiknya, artinya partisipan terdorong untuk mencapai kepuasan mendapatkan perasaan positif tentang pengalaman belajar mereka; (iii) PS yang dinilai dapat meningkatkan keahlian diri partisipan. Partisipan telah mempunyai ekspektasi mengenai peran lulusan PS ini dalam pelayanan kesehatan; dan (iv) trend/gaya hidup di masyarakat. Perlu banyak pertimbangan dalam memilih program studi yang akan ditempuh untuk menentukan karir, termasuk trend/gaya hidup di masyarakat yang sudah sesuai atau tidak dengan prospek program studi ini di masa depan.

Tabel 3. Jumlah PS MIK Jenjang Diploma dan Sarjana

No.	Provinsi	Jumlah PS MIK	Jumlah Mahasiswa
1	Sumatera Utara*	5	406
2	Sumatera Barat	1	68
3	Riau*	3	143
4	Banten	2	87
5	Jakarta*	8	301
6	Jawa Barat*	5	396
7	Jawa Tengah*	12	579
8	Yogyakarta	6	627
9	Jawa Timur*	7	1164
10	Bali*	4	132
11	Nusa Tenggara Timur	1	-
12	Sulawesi Tenggara	2	248
	Total	56	4151

Sumber data: PDDIKTI (2022). Data termasuk PS Rekam Medis dan Informasi Kesehatan (RMIK). Keterangan: *) Propinsi yang termasuk dalam survei ini.

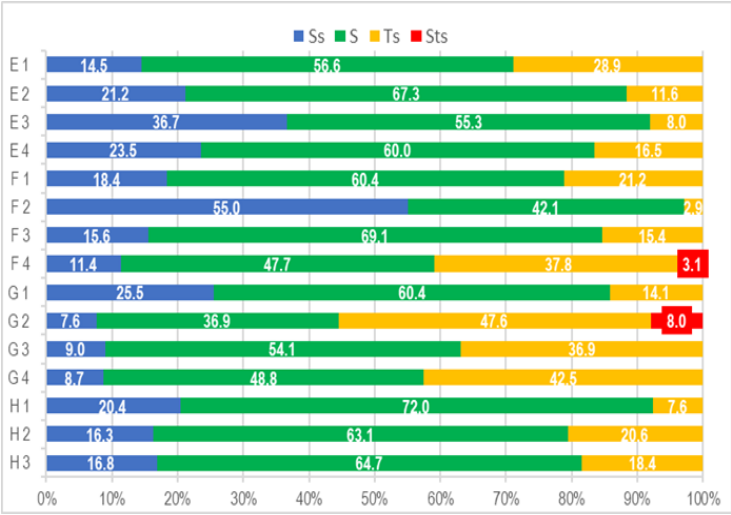
Selanjutnya, tingkat persepsi partisipan terhadap *quality*

PS MIK (C1) 92.9% menyatakan bahwa partisipan mudah mencari pekerjaan setelah lulus PS ini. Ini berarti PS MIK dipandang mempunyai keunggulan dan dapat bersaing dengan PS lainnya. Tingkat persepsi partisipan terhadap *service* PS MIK (C2), 83.0% partisipan menyatakan PS ini telah banyak diselenggarakan di wilayah tinggalnya. Ini menunjukkan bahwa PS MIK populer dan memang dikenal oleh partisipan, meskipun lembaga PS MIK hanya terdapat di 7 provinsi dari 18 provinsi partisipan berada (Tabel 3). Data ini juga menunjukkan PS MIK yang akan diselenggarakan UT (dengan sistem PJJ) akan bersaing dengan kompetitor langsung dari PS sejenis dari perguruan tinggi lain di 12 provinsi.

Minat partisipan kepada PS MIK terindikasi dari variabel *positive toward*, *desire*, dan *idea*. Partisipan tidak berkeberatan (D1) kuliah di PS MIK bervariasi menurut tiga kategori respon, yaitu: 18.1% sangat setuju, 68.2% setuju, dan 13.7% tidak setuju. Dalam hal ini, tingkat preferensi *positive toward* PS ini adalah 86.3% partisipan tidak keberatan kuliah di PS MIK. Selanjutnya, tingkat preferensi *desire* partisipan 81.9% berminat kuliah di PS MIK (D2), menunjukkan PS MIK patut dipilih untuk kuliah. Angka ini sedikit berkurang (sekitar 4%) dari tingkat preferensi *positive toward*. Angka ini meningkat kembali sekitar 2% menjadi sekitar 83.9% ketika partisipan memandang bahwa kuliah di PS MIK (D3) adalah keputusan yang baik (*idea*), ini semakin kuat menunjukkan PS MIK patut dipilih dan bahkan patut ditempuh untuk melanjutkan studi.

3. Tingkat Persepsi dan Prospek Minat kepada PS MIK dengan Sistem PJJ

Distribusi frekuensi partisipan pada aspek akses dan literasi TIK, faktor pendukung PJJ, literasi PJJ, dan prospek minat partisipan terhadap PS MIK dengan sistem PJJ disajikan pada Gambar 2.



Keterangan: *Ss*, Sangat setuju; *S*, Setuju; *Ts*, Tidak setuju; *Sts*, Sangat tidak setuju; *E1*, Akses komputer; *E2*, Akses internet; *E3*, Literasi TIK; *E4*, Keterampilan TIK; *F1*, Kebijakan; *F2*, Layanan internet; *F3*, Infrastruktur; *F4*, Harga sarana; *G1*, Fleksibilitas; *G2*, Efektivitas; *G3*, Interaksi; *G4*, Umpan balik; *H1*, Sumber belajar; *H2*, Penyelenggaraan; *H3*, Biaya PJJ.

Gambar 2. Distribusi Frekuensi Aspek-Aspek Minat PS MIK Sistem PJJ

Kondisi akses dan literasi TIK partisipan bervariasi dalam hal kepemilikan komputer, keterampilan menggunakan aplikasi dalam komputer, dan akses internet. Kondisi individual partisipan yang memiliki komputer yang memadai hanya sekitar 71.1% (E1), dengan tingkat kelayakan yang berbeda antara 14.5% sangat memadai dan 56.6% memadai. Kondisi individual partisipan yang memiliki akses ke jaringan internet dengan baik hanya 88.4% (E2). Kondisi keterampilan TIK partisipan sebagian besar (83.5%) mampu menggunakan aplikasi komputer untuk melaksanakan tugas-tugas (E4), dengan tingkat kualitas 23.5% "mahir" dan

60.0% "bisa". Literasi teknologi informasi (E3) partisipan umumnya hampir seragam (92,3%) memandang bahwa TIK membuat proses pembelajaran menjadi lebih efektif.

Pada aspek faktor pendukung PJJ (F1-F4) dari lingkungan eksternal partisipan, hampir semua partisipan (97.1%) memandang PJJ memerlukan akses ke pelayanan jaringan internet yang memadai (F2), sementara baru sekitar 84.6% partisipan merasakan infrastruktur dan kondisi jaringan internet di wilayahnya memadai (F3). Namun, berbeda dengan itu, tingkat preferensi partisipan menilai kebijakan pemerintah yang mendukung PJJ (F1) masih rendah (78.8%) dan tingkat preferensi partisipan paling rendah (59.1%) tentang keterjangkauan harga sarana pendukung PJJ (F4).

Pada aspek literasi PJJ (G1-G4), tingkat preferensi partisipan 85.9% menerima dengan baik aspek fleksibilitas dalam PJJ (bisa dilakukan kapan saja dan dimana saja). Sementara pada tiga aspek lainnya, persepsi partisipan masih sangat rendah dan berbeda pandangan mengenai intensitas relasi, perolehan umpan balik, dan efektivitas kuliah pada sistem PJJ. Tingkat preferensi partisipan kuliah dengan sistem PJJ dapat menjalin interaksi dengan baik, memperoleh umpan balik pembelajaran dengan cepat, dan lebih terorganisasi dengan baik, masing-masing hanya 63.1%, 57.5%, dan 44.5%. Nampak bahwa tingkat preferensi partisipan terhadap efektivitas kuliah sistem PJJ (membuat proses pembelajaran lebih terorganisasi) paling rendah dan dengan respon yang sangat bervariasi.

Prospek PS MIK dengan sistem PJJ (H1-H3) tinggi (92.4%) dilihat dari tingkat preferensi partisipan bahwa sumber pembelajaran PS ini banyak tersedia di internet. Namun, tingkat prospek ini lebih rendah (79.4%) ditunjukkan oleh tingkat preferensi opini partisipan bahwa PS MIK dapat diselenggarakan dengan sistem PJJ. Sementara itu, tingkat prospek ini sedikit cukup tinggi (81.6%) dari segi preferensi partisipan kepada aspek biaya kuliah PS MIK dengan sistem PJJ lebih murah. Tingkat preferensi biaya murah ini kemungkinan akan lebih kecil untuk PS MIK biasa (bukan sistem PJJ), yang berarti lebih mahal.

Tingkat preferensi partisipan pada variabel-variabel aspek sistem PJJ, menunjukkan: (i) tingkat persepsi yang tinggi untuk kondisi akses internet, literasi TIK, pelayanan jaringan internet, infrastruktur jaringan internet wilayah, fleksibilitas PJJ, dan prospek sumber belajar di internet; (ii) tingkat persepsi yang cukup tinggi untuk keterampilan TIK dan prospek biaya kuliah dalam PJJ; dan (iii) tingkat persepsi yang lebih rendah untuk kondisi kepemilikan komputer, kebijakan pemerintah pada PJJ, harga sarana pendukung, aspek efektivitas, interaksi, umpan balik PJJ, dan prospek PS MIK dengan PJJ.

4. Karakterisasi Prospek Minat kepada PS MIK dengan Sistem PJJ

Hasil deskripsi di atas menunjukkan bahwa partisipan memiliki preferensi tinggi pada hampir semua aspek peminatan PS MIK. Namun, pada aspek PJJ, menunjukkan tingkat preferensi yang bervariasi antar aspek.

Untuk memeriksa adanya struktur yang kuat dari asosiasi antar variabel, diperlukan tingkat asosiasi yang cukup tinggi antar variable; dan kemudian, secara visual ditampilkan posisi masing-masing variabel dalam suatu plot bidang datar dua dimensi pertama dari asosiasi antar variabel tersebut (Dim 1 pada sumbu mendatar dan Dim 2 pada sumbu tegak). Pada Tabel 4 disajikan statistik reliabilitas *alpha Cronbach* dari instrumen. Proyeksi posisi masing-masing variabel, individual partisipan, maupun kategori variabel, pada plot bidang datar dua dimensi ditampilkan pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 6.

Tabel 4. Statistik Reliabilitas Instrumen

(a) Seluruh variabel

	Cronbach's			
*Dim**	Alpha	Inertia	Proportion	Cumulative
Dim 1	0.945	0.401	0.200	0.194
Dim 2	0.844	0.190	0.095	0.295
Mean	0.912	0.295		

(b) Menurut kelompok variabel (laten)

		Cronbach's			
	*Dim**	Alpha	Inertia	Proportion	Cumulative
A. Brand Awareness	*Dim 1*	0.849	0.688	0.393	0.393
	Dim 2	0.590	0.448	0.256	0.649
	Mean	0.747	0.568		
B. Attitude	*Dim 1*	0.862	0.708	0.354	0.354
	Dim 2	0.715	0.539	0.269	0.623
	Mean	0.799	0.623		
C. Persepsi	*Dim 1*	0.710	0.775	0.388	0.388
	Dim 2	0.273	0.579	0.290	0.677
	Mean	0.524	0.677		
D. Intensi/ Minat PS	*Dim 1*	0.890	0.820	0.410	0.410
	Dim 2	0.833	0.750	0.375	0.785
	Mean	0.863	0.785		
E. Akses dan Literasi TIK	*Dim 1*	0.761	0.583	0.291	0.291
	Dim 2	0.509	0.405	0.202	0.494
	Mean	0.658	0.494		
F. Faktor PJJ	*Dim 1*	0.684	0.514	0.257	0.257
	Dim 2	0.495	0.397	0.199	0.456
	Mean	0.602	0.456		
G. Literasi PJJ	*Dim 1*	0.807	0.633	0.281	0.281
	Dim 2	0.670	0.502	0.223	0.505
	Mean	0.746	0.568		
H. Prospek PS-PJJ	*Dim 1*	0.728	0.648	0.324	0.324
	Dim 2	0.413	0.460	0.230	0.554
	Mean	0.597	0.554		

Keterangan: **Dim*, Dimensi pertama dan kedua MCA.

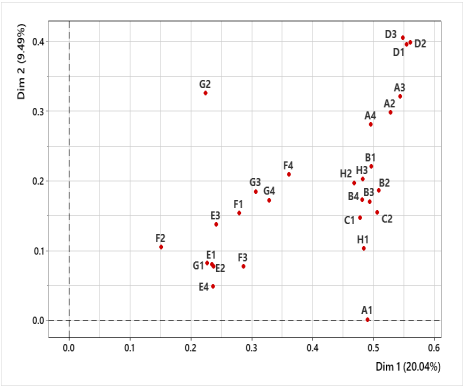
Pada Tabel 4 bagian (a) nilai koefisien *alpha Cronbach* rata-rata 0,912 untuk dua dimensi pertama (Dim 1 dan Dim 2) dari seluruh variabel (28 variabel aktif), menunjukkan adanya tingkat korelasi yang cukup tinggi antar variabel. Pada tabel ini juga disajikan statistik reliabilitas untuk setiap faktor (variabel laten). Faktor persepsi (*quality* dan *service*) mempunyai reliabilitas kecil (0,524). Perlu ditambahkan variabel *price* PS MIK untuk meningkatkan reliabilitas faktor ini. Demikian juga, tingkat reliabilitas faktor prospek 0,597; dapat ditingkatkan dengan menambahkan variabel *desire* atau *idea* tentang PS MIK dengan sistem PJJ. Untuk faktor-faktor lainnya, memiliki tingkat reliabilitas yang cukup tinggi.

Proyeksi posisi masing-masing variabel pada plot bidang datar dua dimensi ditampilkan pada Gambar 3. Dimensi pertama dan kedua hasil analisis MCA dari 28 variabel dalam survei mewakili 29.5% total variansi data, 20.0% oleh dimensi

pertama dan 9.5% oleh dimensi kedua. Tingkat variabilitas data ini meskipun kecil tetapi cukup signifikan mewakili struktur dari seluruh variabel; dengan nilai alpha Cronbach 0,912 (Tabel 4). Persentase variabilitas ini juga lebih besar dari persentase minimal untuk mewakili struktur utama dari 28 variabel. Untuk N=100 individu dan 30 variabel, total keragaman yang diperlukan untuk mewakili struktur data adalah 13.6% untuk total kedua dimensi dan 7,9% untuk dimensi pertama (Husson, Josse, Lê, & Mazet, 2017).

Correlations (η^2) with Dimensions 1 and 2

Variable	Dim 1	Dim 2	Variable	Dim 1	Dim 2
A1	0.490	0.001	E2	0.237	0.078
A2	0.527	0.298	E3	0.241	0.137
A3	0.544	0.321	E4	0.236	0.049
A4	0.495	0.281	F1	0.279	0.154
B1	0.496	0.221	F2	0.151	0.105
B2	0.508	0.186	F3	0.286	0.077
B3	0.493	0.170	F4	0.360	0.209
B4	0.481	0.173	G1	0.227	0.082
C1	0.477	0.147	G2	0.224	0.326
C2	0.506	0.155	G3	0.306	0.185
D1	0.554	0.396	G4	0.329	0.172
D2	0.560	0.398	H1	0.484	0.103
D3	0.548	0.405	H2	0.468	0.197
E1	0.234	0.081	H3	0.482	0.203



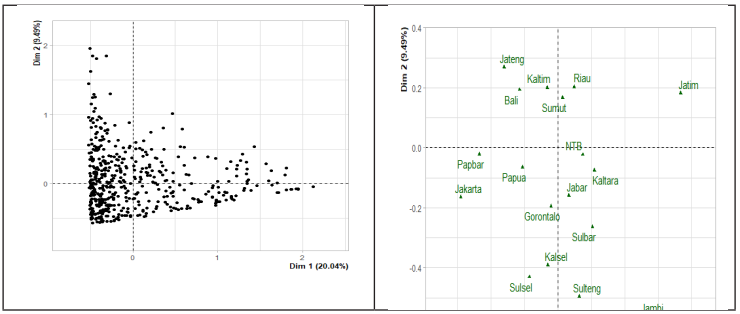
Keterangan: *A1*, Recognition; *A2*, Memorable; *A3*, Recall; *A4*, Notice; *B1*, Utilitarian; *B2*, Ego defensive; *B3*, Value expressive; *B4*, Knowledge; *C1*, Quality; *C2*, Product services; *D1*, Positive toward; *D2*, Desire; *D3*, Idea; *E1*, Akses komputer; *E2*, Akses internet; *E3*, Literasi TIK; *E4*, Keterampilan TIK; *F1*, Kebijakan; *F2*, Layanan internet; *F3*, Infrastruktur; *F4*, Harga sarana; *G1*, Fleksibilitas; *G2*, Efektivitas; *G3*, Interaksi; *G4*, Umpan balik; *H1*, Sumber belajar; *H2*, Penyelenggaraan; *H3*, Biaya PJJ.

Gambar 3. Proyeksi Posisi setiap Variabel pada Dim 1 dan Dim 2: Korelasi (η^2) Variabel dengan Dua Dimensi Pertama MCA dari 28 Variabel Aktif

Pada Gambar 3, dimensi 1 dikarakterisasi oleh: (i) kondisi individual partisipan dalam kemampuan TIK, infrastruktur jaringan internet di wilayahnya, dan pandangannya terhadap fleksibilitas PJJ (E1, E2, E4, F3, dan G1); (ii) *recognition*, *attitude* dan persepsi partisipan kepada PS MIK (A1, B1-B4, C1-C2); dan, (iii) prospek PS MIK dengan PJJ (H1-H3). Sejumlah 15 variabel ini memiliki tingkat pembeda yang tinggi pada dimensi 1. Sementara itu, dimensi 2 dikarakterisasi oleh satu variabel (G2) yaitu pandangan partisipan terhadap efektivitas pembelajaran PJJ. Kemudian, 12 variabel lainnya membedakan dimensi 1 maupun dimensi 2, yaitu: (i) *awareness* dan minat partisipan kepada PS MIK (A2-A4, D1-D3); dan, (ii) peranan TIK dalam efektivitas proses pembelajaran, faktor kebijakan, layanan internet, dan harga sarana pendukung PJJ, dan pandangan partisipan terhadap proses interaksi dan umpan balik dalam PJJ (E3, F1, F2, F4, G3, G4).

Karakteristik dimensi 1 dan 2 dapat lebih jelas dilihat dari plot proyeksi kategori masing-masing variabel pada Gambar 4 (kanan). Oleh karena respon partisipan pada setiap variabel umumnya terdistribusi ke dalam tiga kategori, maka tampak dalam gambar posisi masing-masing kategori mengumpul ke dalam tiga *klaster* respon. Dimensi 1 memisahkan partisipan dengan respon sangat setuju dari dua respon lainnya, sedangkan dimensi 2 memisahkan partisipan respon tidak setuju (atau sangat tidak setuju) dari partisipan respon setuju.

Pada Gambar 4 (kanan) juga tampak partisipan dengan respon sangat setuju (*klaster Ss*, sebelah kanan) mempunyai nilai rata-rata dimensi 1 positif yang berbeda-beda untuk setiap variabel; tertinggi untuk A2 (*memorable* PS) dan G4 (umpan balik PJJ), terendah F2 (layanan internet) dan E3 (efektivitas TIK); dan, nilai dimensi 2 yang relatif sama sekitar nilai nol. Sebaliknya, pada respon setuju (*klaster S*, kiri-bawah, sekitar origin), rata-rata nilai dimensi 1 maupun dimensi 2 adalah negatif dan relatif sama antar variable; kecuali yang sedikit berbeda adalah variabel G2 (efektivitas PJJ) yang mempunyai nilai dimensi 1 mendekati nol. Sementara itu, pada respon *tidak setuju* (*klaster Ts,* bagian kiri-atas), rata-rata memiliki nilai dimensi 1 negatif dan relatif sama, tetapi memiliki nilai dimensi 2 positif dan berbeda-beda.



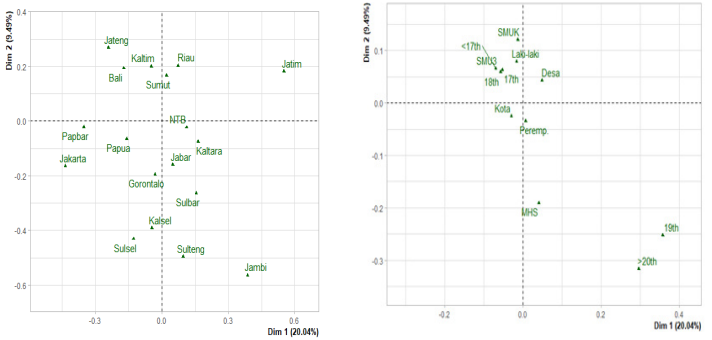
Gambar 4. Proyeksi Posisi Individual Partisipan (Kiri) dan Posisi Kategori Variabel (Kanan) pada Dim 1 dan Dim 2

Tiga klaster kategori-variabel pada Gambar 4 (kanan) menunjukkan bahwa setiap variabel berasosiasi kuat kepada prospek PS MIK-PJJ, ditunjukkan oleh posisi setiap variabel mengelompok ke dalam setiap kategori dengan jarak yang berdekatan. Karakteristik ini berhasil menunjukkan: (*i*) tingkat minat partisipan kepada PS MIK berasosiasi dengan faktor *brand awareness* (Coyle, 2022), *attitude*, dan *persepsi* (Suhardi, Susilo, Priyanto, & Abdi, 2021); dan, (*ii*) tingkat minat kepada PS MIK-PJJ berasosiasi dengan tingkat minat kepada PS MIK, kondisi akses/keterampilan/literasi TIK, faktor pendukung, dan literasi PJJ (Susilo, Darojat, & Suhardi, 2019).

Berdasarkan analisis proyeksi variabel dan kategori variabel pada Gambar 3 dan Gambar 4 (kanan) tersebut, dimensi 1 diinterpretasi sebagai *tingkat minat kepada PS MIK-PJJ*. Tingkat minat ini berhubungan erat dengan keunggulan PS MIK, kualitas dan daya dukung sistem PJJ. Sementara itu, dimensi 2 diinterpretasi sebagai *tingkat resitensi kepada PS MIK-PJJ*. Tingkat resistensi ini berhubungan dengan masih adanya mispersepsi terhadap PS MIK maupun PJJ, dan lemahnya kondisi daya dukung untuk mengikuti sistem PJJ.

Proyeksi posisi masing-masing kategori variabel deskriptif partisipan (provinsi, wilayah tinggal, usia, jenis kelamin, dan pendidikan) pada plot bidang datar dua dimensi ini ditampilkan pada Gambar 5. Pada gambar bagian kiri, klaster preferensi tinggi (*sangat setuju*) prospek MIK-PJJ diwakili oleh partisipan di

provinsi: Jatim*, Jambi, Kaltara, Sulbar, Sulteng, NTB, Riau*, Jabar*, dan Sumut*. Pada klaster kedua (preferensi *setuju*) berasosiasi dengan partisipan di provinsi: Gorontalo, Kalsel, Sulsel, Papua, Papbar, dan Jakarta*. Menurut Tabel 3, PS MIK sudah ada diselenggarakan di 5 dari 15 provinsi ini, yaitu Jatim, Jabar, Riau, Sumut, dan Jakarta. Pada gambar bagian kanan, klaster pertama dan kedua partisipan ini berasosiasi dengan usia 19 tahun ke atas, lulusan SMU/K berstatus mahasiswa, tinggal di wilayah perkotaan maupun desa, dan umumnya partisipan perempuan. Sementara itu, pada klaster ketiga (resistensi tinggi, *tidak setuju*) diwakili partisipan di tiga provinsi lainnya (Bali, Kalteng, dan Jateng), berasosiasi dengan usia 18 tahun atau lebih muda, *fresh graduate* atau masih pelajar SMU/K, dan umumnya laki-laki.



Gambar 5. Proyeksi Posisi Kategori Variabel Provinsi (Kiri) dan Kategori Variabel Deskriptif Lainnya (Kanan) pada Dim 1 dan Dim 2

Kembali ke Gambar 4, proyeksi posisi individual partisipan ditampilkan pada kotak sebelah kiri. Persebaran titik-titik posisi individual partisipan tersebar ke arah sisi horizontal (kanan, preferensi tinggi) maupun sisi vertikal (atas, resistensi tinggi). Posisi partisipan pada gambar tersebut dengan menggunakan batas origin dapat dibagi ke dalam empat area (kuadran). Tingkat kepadatan partisipan pada masing-masing area dan karakteristiknya diringkas-sajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Frekuensi, Kontribusi, dan Karakteristik Partisipan Menurut Area Dimensi

Area	Frekuensi		Kontribusi (%) ke:		Karakteristik
	N	%	Dim 1	Dim 2	
I. Kanan-atas	81	14.6	22.9	8.6	• *Klaster Ss* : Prospek minat tinggi • Persepsi dan minat kepada MIK tinggi • Kondisi akses, layanan, dan sumber belajar di internet tinggi • Provinsi Jatim*, Riau*, dan Sumut*
II. Kanan-bawah	101	18.3	52.3	5.3	• *Klaster Ss* : Prospek minat tinggi • Minat kepada MIK-PJJ tinggi • Faktor pendukung mengikuti PJJ tinggi : kepemilikan komputer, keterampilan TIK, dan harga sarana terjangkau • Persepsi kepada PJJ tinggi • Provinsi Jambi, Kaltara, Sulbar, Sulteng, NTB, dan Jabar* • Status mahasiswa • Usia 19 tahun atau di atasnya
III. Kiri-bawah	213	38.5	15.0	29.8	• *Klaster S*: Prospek minat cukup tinggi • Persepsi dan minat kepada MIK-PJJ cukup tinggi • Daya dukung mengikuti PJJ tinggi • Provinsi: Gorontalo, Kalsel, Sulsel, Papua, Papbar, dan Jakarta*

Area	Frekuensi		Kontribusi (%) ke:		Karakteristik
	N	%	Dim 1	Dim 2	
IV. Kiri-atas	158	28.6	9.8	56.3	• *Klaster Ts*: Resistensi tinggi • Persepsi dan minat MIK/PJJ rendah • Daya dukung mengikuti PJJ rendah • Provinsi : Bali, Kalteng, Jateng • Usia 18 tahun atau di bawahnya • *Fresh graduate* atau pelajar SMU/K

Keterangan: *) Terdapat perguruan tinggi yang menyelenggarakan PS MIK jenjang diploma/sarjana.

Posisi individual partisipan pada area I (kanan-atas) terdiri atas 81 (14.6%) orang dengan karakteristik: persepsi dan minat kepada MIK tinggi, memiliki kondisi akses dan layanan internet baik, dan persepsi yang tinggi kepada sumber belajar di internet. Partisipan area ini berada di provinsi Jatim*, Riau* dan Sumut*; di ketiga provinsi ini telah terdapat perguruan tinggi yang menyelenggarakan PS MIK. Jumlah dan karakteristik partisipan di area I ini cukup signifikan memiliki kontribusi kepada dimensi 1 sebesar 22.9%. Area I termasuk klaster 1 prospek minat tinggi (*sangat setuju*) pada Gambar 4 sebelah kanan.

Partisipan pada area II (kanan-bawah) terdiri atas 101 (18.3%) orang dengan kontribusi 52.3% kepada dimensi 1. Karakteristik partisipan pada area ini meliputi: minat kepada MIK-PJJ tinggi, memiliki sarana komputer dan keterampilan TIK, memandang harga sarana pendukung untuk mengikuti PJJ terjangkau, dan persepsi kepada PJJ tinggi. Partisipan ini umumnya adalah lulusan SMU/K/sederajat yang berstatus mahasiswa, atau usia 19 tahun atau di atasnya. Partisipan berada di provinsi Jambi, Kaltara, Sulbar, Sulteng, NTB, dan Jabar* (terdapat perguruan tinggi PS MIK). Area II ini juga termasuk klaster 1 prospek minat tinggi (sangat setuju) pada Gambar 4 sebelah kanan.

Posisi individual partisipan pada area III (kiri-bawah) terdiri atas 213 orang (38.5%) dengan kontribusi 15.0% kepada dimensi 1 dan 29.8% kepada dimensi 2. Area partisipan ini termasuk klaster 2 dengan prospek minat cukup tinggi (*setuju*). Karakteristik partisipan area ini dicirikan oleh variabel-variabel pada kedua dimensi, yaitu: persepsi dan minat kepada MIK-PJJ cukup tinggi, serta memiliki kondisi faktor pendukung mengikuti PJJ yang baik. Partisipan ini berada di provinsi: Gorontalo, Kalsel, Sulsel, Papua, Papbar, dan Jakarta* (terdapat perguruan tinggi PS MIK).

Posisi individual partisipan pada area IV (kiri-atas) terdiri atas 158 orang (28.6%) dengan kontribusi terbesar kepada dimensi 2 (56.3%). Karakteristik partisipan area ini adalah klaster 3 resistensi tinggi (tidak setuju), memiliki tingkat persepsi dan minat kepada MIK maupun PJJ rendah, serta kondisi faktor pendukung (TIK maupun infrastruktur dan sarana) mengikuti PJJ rendah. Partisipan ini bersia 18 tahun atau di bawahnya, *fresh graduate* atau masih pelajar SMU/K. Mereka berada di provinsi : Bali, Kalteng, dan Jateng.

Posisi partisipan area I-III memiliki prospek minat kepada PS MIK dengan sistem PJJ tinggi, mencapai 71.4% partisipan dengan total kontribusi 90.2% kepada dimensi 1 dan 43.7% kepada dimensi 2. Mereka memiliki tingkat persepsi dan minat yang tinggi kepada PS MIK maupun PJJ, yang juga memiliki kondisi TIK dan faktor pendukung lainnya untuk mengikuti PJJ. Tingkat minat yang tinggi partisipan ini berasosiasi dengan tingginya persepsi partisipan pada aspek *positif toward*, *desire*, dan *idea*, ketersediaan sumber belajar di internet, dan lebih murahnya biaya PS MIK-PJJ. Tingkat minat ini juga berasosiasi dengan sikap positif (*attitude*) partisipan kepada PS MIK, ini menujukan tingkat minat juga berhubungan dengan tingkat kebutuhan calon mahasiswa kepada PS MIK.

Tingginya tingkat minat dan kebutuhan calon mahasiswa menunjukkan keunggulan/daya saing PS MIK dari kompetitor PS sejenis dan/atau PS lainnya maupun perguruan tinggi PJJ dengan perguruan tinggi lainnya. Sangat diperlukan pengelolaan media komunikasi yang tepat untuk memperkuat citra dan keunggulan dari PS MIK maupun PJJ dan mendorong minat pemilihan masyarakat. Hal ini terutama berkaitan dengan karakteristik partisipan di area IV (kiri-atas, resistensi tinggi). Selain itu, untuk

meningkatkan peluang pemilihan PS-PJJ ini, perlu pemanfaatan media untuk memperkuat persepsi masyarakat pada aspek *price*, *quality*, dan *service* dari PS ini.

Berdasarkan karakteristik individual partisipan, pada area I (kanan-atas), karakteristik partisipan yang berminat tinggi kepada PS MIK-PJJ berada di 9 provinsi: Sumut*, Riau*, Jabar*, Jatim*, Jambi, Kaltara, Sulbar, Sulteng, dan NTB. Peminat pada 9 provinsi ini umumnya cukup lama lulus SMU/K (19 tahun ke atas) atau berstatus mahasiswa. Namun, di empat provinsi area ini terdapat kompetitor PS MIK dari perguruan tinggi lain. Sedikit berbeda dengan area I-II, peminat berada di 6 provinsi lainnya (area III): Gorontalo, Kalsel, Sulsel, Papua, Papbar, dan Jakarta*, tidak didominasi oleh usia atau status pendidikan tertentu; artinya, peminat adalah mereka yang masih pelajar, *fresh graduate* SMU/K, mereka yang telah lama lulus SMU/K, atau berstatus mahasiswa. Dengan demikian, strategi promosi dan target pasar di kelompok 6 provinsi ini akan berbeda dengan di kelompok 9 provinsi.

KESIMPULAN

Prospek minat calon mahasiswa kepada PS MIK dengan sistem PJJ teridentifikasi dari banyaknya partisipan (71.4%) yang menaruh minat yang tinggi kepada keunggulan PS MIK maupun sistem PJJ, serta memiliki kesiapan kondisi akses/keterampilan TIK dan faktor pendukung lainnya untuk dapat mengikuti sistem PJJ. Sebagian partisipan lainnya (28.6%), masih resisten, terkendala mispersepsi kepada PS MIK maupun PJJ, serta kurang memiliki daya dukung individu maupun lingkungan untuk dapat mengikuti sistem PJJ. Kedua posisi partisipan ini berkaitan erat dengan wilayah tinggal (provinsi), usia, dan status pendidikannya saat ini. Ini berarti, prospek minat calon mahasiswa terhadap PS MIK dengan sistem PJJ tergantung kepada faktor keunggulan dan daya saing program studi itu sendiri, serta faktor sosial, ekonomi, dan demografis individual maupun lingkungan geografis calon mahasiswa.

Sebagai perbaikan instrumen bagi survei sejenis ini, peningkatan reliabilitas faktor persepsi kepada program studi dapat ditambahkan variabel biaya (*price*) program studi; sedangkan untuk meningkatkan reliabilitas faktor prospek, perlu ditambahkan variabel *desire* dan *idea* peminatan program studi dengan sistem PJJ.

DAFTAR PUSTAKA

AHIMA-GHWC [American Health Information Management Association-Global Health Workforce Council]. (2015). Global academic curricula competencies for health Information Professionals. Retrieved from https://www.ahima.org

Coyle, R. E. (2022). The impact of brand awareness on purchase intention among consumers using social media. Trident University International. *ProQuest Dissertations Publishing,* 29253296. Retrieved from https://www.proquest.com/docview/2688071482/6B428087748848CAPQ/1

de Boer, H., Huisman, J., Klemperer, A., van der Meulen, B., Neave, G., Theisens, H., & van der Wende, M. (2002). Academia in the 21st century: An analysis of trends and perspectives in higher education and research. Den Haag: AWT.

Delafrooz, N., Paim, L. H., & Khatibi, A. (2009). Developing an instrument for measurement of attitude toward online shopping. *European Journal of Social Sciences*, 7(3), 166–177.

Grunert, K. G. (2005). Food quality and safety: consumer perception and demand. *European Review of Agricultural Economics,* 32(3), 369–391.

Hatta, G. (2016). Pedoman manajemen informasi kesehatan di sarana pelayanan kesehatan (rev. ed). Jakarta: UI Press Indonesia.

Husson, F., Lê, S. & Pagès, J. (2017). Exploratory multivariate analysis by example using R. Boca Raton: CRC Press.

Husson, F., Josse, J., Lê, S., & Mazet, J. (2017). FactoMineR: Multivariate exploratory data analysis and data mining with R. R Package Version 1.35.

Indeed (2021). 6 top careers in health information management. *indeed editorial Team, September 29, 2021*. Retrieved from https://www.indeed.com/career-advice/finding-a-job/health-information-management-careers

Kalenskaya, N., Gafurov, I., & Novenkova, A. (2013). Marketing of educational services: Research on service providers satisfaction. International Conference on Applied

Economics (ICOAE). Procedia Economics and Finance, 5, 368 – 376. doi: 10.1016/S2212-5671(13)00044-0.

Lee, J., & Lee, J. N. (2015). How purchase intention consummates purchase behaviour: the stochastic nature of product valuation in electronic commerce. *Behaviour & Information Technology,* 34(1), 57–68.

Lenfle, S. (2014). Toward a genealogy of project management: sidewinder and the management of exploratory projects. Int. J. Proj. Manag. 32, 921–931. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.10.017.

Loch, C.H., DeMeyer, A., & Pich, M. (2011). Managing the unknown: A new approach to managing high uncertainty and risk in projects. John Wiley & Sons.

Malik, M. E., Ghafoor, M. M., Hafiz, K. I., Riaz, U., Hassan, N. U., Mustafa, M., & Shahbaz, S. (2013). Importance of brand awareness and brand loyalty in assessing purchase intentions of consumers. *International Journal of Business and Social Science*, 4(5), 167–171.

McLeod, S. (2021). Feasibility studies for novel and complex projects: Principles synthesised through an integrative review. *Project Leadership and Society*, 2, 100022. The University of Western Australia. Elsevier, ScienceDirect. https://doi.org/10.1016/j.plas.2021.100022

Meinke, H. (2020). 7 jobs you can get with a health information management degree. Health Information Management on 03/23/2020. Rasmussen University. Retrieved from https://www.rasmussen.edu/degrees/health-sciences/blog/jobs-with-health-information-management-degree/

Mesly, O. (2017). Project feasibility: Tools for uncovering points of vulnerability. CRC Press, Boca Raton.

Nobelius, D., & Trygg, L. (2002). Stop chasing the front end process — management of the early phases in product development projects. Int. J. *Proj. Manag*. 20, 331–340. https://doi.org/10.1016/S0263-7863(01)00030-8.

Samset, K., & Volden, G. H. (2016). Front-end definition of projects: ten paradoxes and some reflections regarding project management and project governance. Int. *J. Proj.Manag*. 34, 297–313. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.01.014.

Sladek, A. M. (2014). Constructing the crisis: Audeience perceptions of for-profit education and institutional integrity in the closure of Dana College. *International Journal for Educational Integrity*, 10(2), 60-70.

Solomon, M., Russell-Bennett, R., & Previte, J. (2012). Consumer behaviour. Pearson Higher Education Australia.

Suhardi, D.A., Susilo, A., Priyanto, S.H., & Abdi, A. S. (2021). Brand auditing and the development of the brand salience management model of the Statistics Study Program. *J Innov Entrep* 11, 24 (2022). https://doi.org/10.1186/s13731-022-00215-6

Susilo, A., Darojat, O., & Suhardi, D. A. (2019). Survei kesiapan dan kepuasan mahasiswa terhadap layanan proses pembelajaran dalam jaringan Universitas Terbuka saat pandemic Covid 19. *Jurnal Pendidikan Terbuka Dan Jarak Jauh, 20 (2)*. https://doi.org/10.33830/ptjj.v20i2.839.2019

UT [Universitas Terbuka]. (2020). Rencana Strategis Bisnis Universitas Terbuka Tahun 2021-2025.

Youssef, L. (2014). Globalisation and higher education: from within-border to cross-border. *Open Learning: The Journal of Open, Distance and e-Learning*, 29(2), 100–115. https://doi.org/10.1080/02680513.2014.932686.

PENERAPAN ANALISIS FAKTOR DALAM MEMBENTUK FAKTOR LATEN YANG MEMENGARUHI KEPUASAN PESERTA DIDIK MATAKULIAH KIMIA DASAR TERHADAP VIDEO PEMBELAJARAN INTERAKTIF

THE APPLICATION OF FACTOR ANALYSIS IN FORMING LATENT FACTORS WHICH AFFECTS THE SATISFACTION OF BASIC CHEMISTRY COURSE STUDENT TOWARD INTERACTIVE LEARNING VIDEOS

Siti Hadijah Hasanah[1*], Adhi Susilo[2], Sigit Supriyadi[1]

[1]Program Studi Statistika, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi,
Universitas Terbuka
[2]Program Studi Teknologi Pangan, Jurusan Pertanian, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

*sitihadijah@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Penerapan pendidikan berbasis online yang meningkat disaat pandemi membuat perguruan tinggi cepat beradaptasi serta berinovasi untuk mengembangkan media pembelajaran secara online, salah satunya dengan membuat video pembelajaran. Video pembelajaran merupakan salah satu media penunjang dalam melakukan aktivitas pembelajaran dan sebagai suatu cara yang baik untuk meningkatkan motivasi peserta didik dalam proses belajar. Adanya video pembelajaran juga dapat meningkatkan kepuasan bagi para pengajar di dalam dunia pendidikan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis persepsi peserta didik terhadap video pembelajaran interaktif serta membentuk faktor laten yang memengaruhi kepuasan peserta didik terhadap video pembelajaran interaktif mata kuliah Kimia Dasar (KIMD4110). Data penelitian ini berasal dari data primer hasil pengisian kuisioner oleh para peserta didik, yang berjumlah 120 responden. Pendekatan analisis yang digunakan dalam penelitian ini yaitu pendekatan statistika deskriptif dan inferensia

dengan menggunakan analisis faktor. Berdasarkan hasil analisis deskriptif didapatkan bahwa rata-rata peserta didik memberikan apresiasi yang sangat baik terhadap keseluruhan indikator dalam video pembelajaran mata kuliah Kimia Dasar (KIMD4110). Berdasarkan tingkat kepuasan, peserta didik memberikan apresiasi setuju dan sangat setuju sebesar lebih dari 80% pada 75% indikator. Sedangkan berdasarkan analisis faktor terdapat 4 variabel laten yang memengaruhi kepuasan peserta didik terhadap video pembelajaran interaktif Kimia Dasar (KIMD4110) yaitu konten materi, aksesibilitas, aktivitas, dan kolaborasi.

Kata kunci: *analisis faktor, kepuasan mahasiswa, online learning, video pembelajaran*

ABTRACT

The increasing adoption of online-based education during the pandemic has made universities quickly adapt and innovate in developing online learning media; One of them is by making learning videos. Learning videos are one of the supporting media in carrying out learning activities and as a good way to increase students' motivation in the learning process. The existence of learning videos can also increase satisfaction for teachers in the world of education. This study aims to analyze students' perceptions of interactive learning videos, as well as to form latent factors that affect student satisfaction with interactive learning videos for Basic Chemistry courses (KIMD4110). The data of this study came from primary data from the results of filling out questionnaires by students, amounting to 120 respondents. The analytical approach used in this research is descriptive statistical approach and inferential using factor analysis. Based on the results of the descriptive analysis, it was found that on average, students gave a very good appreciation of the overall indicators in the learning video for the Basic Chemistry course (KIMD4110). Based on the level of satisfaction, students gave an appreciation of agree and strongly agree by more than 80% on 75% of the indicators. Meanwhile, based on factor analysis, there are 4 latent variables that affect student satisfaction with the Basic Chemistry interactive learning video (KIMD4110), namely material content, accessibility, activity, and collaboration.

Keywords: *factor analysis, student satisfaction, online learning, learning video*

PENDAHULUAN

Penerapan pendidikan dengan media *online* di masa pandemi cukup meningkat dan populer. Sejumlah perguruan tinggi beradaptasi dengan cepat dan berinovasi menggunakan media *online* dalam proses pengajaran kepada peserta didik mereka. Menurut Dumford dan Miller (2018) terdapat hubungan yang signifikan antara mengambil sistem pembelajaran *online* dengan keterlibatan peserta didik tahun pertama dan tingkat atas. Para peserta didik lebih banyak mengambil pembelajaran *online* dan lebih cenderung terlibat dalam pemikiran kuantitatif, dibandingkan jika mereka ikut pembelajaran yang bersifat kolaboratif. Banyaknya peserta didik yang ikut suatu kelas *online* menunjukkan lebih sedikit mendapatkan praktik pengajaran yang efektif dan lebih rendah dalam membangun interaksi dengan sesama peserta didik. Hubungan antara variabel keterlibatan ini dan persentase kelas yang diambil secara *online* menunjukkan bahwa kelas *online* lebih mungkin menguntungkan pada indikator tertentu, tetapi tidak dengan indikator lainnya. Perguruan tinggi perlu mempertimbangkan temuan ini pada saat merancang konten kuliah *online* mereka dan selanjutnya fakultas harus berpikir lebih kritis tentang cara mendorong para peserta didik dalam mengatasi kekurangan yang terjadi dalam perkuliahan *online*.

Menurut Febrianto, Mas'udah, & Megasari (2020) hasil studi menunjukkan bahwa tidak semua peserta didik suka terhadap pembelajaran *online*, terutama pada masyarakat pedesaan yang belum siap terhadap sistem pembelajaran ini dan masih nyaman menggunakan metode konvensional. Berdasarkan hasil studi inipun terungkap bahwa terdapat 3 faktor yang mendukung sistem pembelajaran *online* sehingga dapat berlangsung secara efektif di Indonesia yaitu faktor sosial, ekonomi, dan budaya.

Hasil studi Alawamleh, Al-Twait, & Al-Saht (2022) menunjukkan bahwa peserta didik lebih suka dengan kelas tatap muka dibandingkan dengan kelas *online* dikarenakan bagi mereka kelas *online* memiliki banyak kendala seperti rendahnya dalam hal pemahaman isi materi, motivasi, komunikasi yang terjalin antara instruktur dengan peserta didik dan perasaan mereka seperti terisolasi saat mengikuti pembelajaran *online*.

Oleh karena itu para instruktur disarankan harus lebih interaktif kepada peserta didik mereka, misalkan instruktur menerapkan berbagai media lain yang digunakan. secara maksimal. Sebagai contoh: penggunaan video, audio, pesan instan *online* group dan secara paralel menggunakan saluran platform *online*, email, dan sebagainya.

Menurut Beheshti, Taspolat, Kaya, & Sapanca (2018) dan Wardhana dan Muhammad (2021) sebagian besar peserta didik mengungkapkan bahwa belajar *online* dengan media video merupakan suatu cara yang bagus untuk meningkatkan motivasi mereka dalam mendengarkan selain menggunakan media audio. Selain itu, media video dapat meningkatkan hasil belajar serta dapat meningkatkan kepuasan bagi para pengajar dalam dunia pendidikan.

Indrawari, Ninghardjanti, Wirawan, & Dirgatama (2020) menyatakan bahwa pengajar harus mampu meningkatkan profesionalismenya melalui pengembangan media pembelajaran, sehingga pengembangan yang dilakukan dapat menjawab permasalahan peserta didik di dalam proses pembelajaran. Sebagai contoh: pengajar dapat membuat desain video pembelajaran yang sesuai dan menyenangkan. Video pembelajaran ini diharapkan mampu sebagai panduan bagi mereka untuk melaksanakan pembelajaran baik dalam dunia usaha maupun industri nantinya.

Menurut Riyana (2007) video pembelajaran yang dihasilkan harus mampu meningkatkan motivasi belajar para peserta didik. Oleh karena itu proses pengembangan video pembelajaran harus memenuhi beberapa karakteristik berikut ini:

a. *Stand alone*

Video yang dikembangkan diharapkan tidak bergantung pada bahan ajar lain atau tidak mewajibkan penggunaan video bersamaan dengan bahan ajar yang lain.

b. *Clarity of massage*

Informasi yang didapatkan peserta didik dalam video pembelajaran diharapkan mampu diterima secara baik dan maksimal, sehingga informasi yang terkandung di dalam memori dapat tersimpan dalam jangka waktu yang lama.

c. *User friendly*

Diharapkan dalam membuat video pembelajaran, bahasa yang digunakan dalam video merupakan bahasa sederhana dan mudah untuk dipahami oleh peserta didik; sehingga informasi yang ditampilkan dalam video dapat membantu para *user* dalam mengaksesnya.

d. Representatif terhadap isi materi

Video pembelajaran diharapkan secara keseluruhan dapat mewakili isi materi; misalkan terdapat materi simulasi yang umumnya materi tersebut terdapat dalam bidang sains.

e. Visualisasi dengan media

Materi yang digunakan dalam video pembelajaran mampu bersifat aplikatif, berproses, serta memiliki akurasi yang tinggi, dan mampu dikemas secara baik dari segi teks, suara, animasi, dan kesesuaian materi pada video.

f. Resolusi berkualitas tinggi

Video yang berisi tampilan grafis dapat dibangun dengan menggunakan teknologi digital serta memiliki resolusi tinggi serta mampu mendukung semua spesifikasi di dalam sistem komputer.

g. Dapat digunakan secara klasikal atau individual

Aksesibilitas video harus mudah dijangkau baik di dalam maupun di luar sekolah serta mampu digunakan secara maksimal.

Berdasarkan beberapa hasil studi di atas dapat disimpulkan bahwa sistem pembelajaran *online* akan lebih efektif bila sistem pembelajaran *online* tersebut berbasis video karena akan meningkatkan hasil belajar peserta didik. Penggunaan video yang efektif sebagai alat pendidikan dapat ditingkatkan dengan mempertimbangkan tiga elemen yaitu cara mengelola muatan kognitif pada video, cara memaksimalkan keterlibatan peserta didik dengan video, dan cara mempromosikan pembelajaran dari video. Salah satu universitas yang juga sedang melakukan pengembangan video pembelajaran adalah Universitas Terbuka (UT).

Universitas Terbuka merupakan salah satu universitas yang mengaplikasikan sistem pendidikan jarak jauh (PJJ) di Indonesia. UT menuntut peserta didik agar mampu belajar secara mandiri. Hal ini berarti, peserta didik tidak langsung bertatap muka dengan pengajar matakuliah ampuan yang bersangkutan, tetapi perlu di fasilitasi pendukung pembelajaran yang efektif, mudah diakses, dan dapat dipahami oleh peserta didik (Triana & Aisyah, 2021). UT menggunakan bahan ajar sebagai media utama yang diberikan kepada peserta didiknya. UT mengembangkan bahan ajar seperti bahan ajar cetak dan non cetak (Universitas Terbuka, n.d.).

Universitas Terbuka menyediakan bahan ajar yang merupakan salah satu fasilitas belajar yang diberikan UT kepada peserta didik. Bahan ajar yang tersedia antara lain (Universitas Terbuka, 2021):

a. Bahan Ajar Utama
   Bahan ajar utama di UT terdiri atas buku materi pokok (BMP), BMP yang terintegrasi dengan audio/ visual/ grafis (atau disebut juga sebagai BMP Plus), dan panduan praktik/praktikum yang dikemas dalam bentuk cetak dan digital.
b. Bahan Ajar Pendukung
   Bahan ajar pendukung UT dalam bentuk audio, audiografis, video, video interaktif, serta bahan ajar dan materi pengayaan yang berbasis *online*.

Selain itu, di era teknologi informasi yang saat ini berkembang semakin pesat, UT diharapkan terus berkembang dan mengikuti perkembangan zaman dengan melakukan inovasi-inovasi yang bertujuan untuk mempermudah masyarakat mendapatkan akses pendidikan yang mudah, cepat dan berkualitas. Salah satu langkah UT untuk mencapai hal tersebut yaitu dengan menggunakan sarana multimedia dalam pembelajaran. Multimedia dapat mempermudah menjelaskan materi-materi yang bersifat abstrak. Untuk mengembangkan multimedia ini, UT memiliki unit Pusat Pengembangan Multimedia (P2M2). P2M2 mengembangkan beberapa video pembelajaran interaktif, selain itu proses pengembangan video pembelajaran telah dilakukan oleh para dosen internal UT atau berkolaborasi dengan dosen dari universitas lain. Beberapa video pembelajaran interaktif yang dihasilkan UT disebarkan kepada para peserta

didik, diantaranya dengan cara mentautkan video-video tersebut ke laman e-learning (aplikasi tutorial online mahasiswa). Peserta didik yang mengikuti tutorial online dan telah mempelajari isi materi serta video yang ditautkan di laman *elearning* UT, pada periode tertentu diminta untuk memberikan tanggapan terhadap video-video pembelajaran; sebagai contoh mata kuliah Kimia Dasar (KIMD4110). Tanggapan ini sebagai bahan evaluasi dalam pengembangan video pembelajaran interaktif pada mata kuliah-mata kuliah yang lain dan sebagai cara untuk meningkatkan kualitas video pembelajaran interaktif di UT.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis persepsi peserta didik terhadap video pembelajaran interaktif mata kuliah Kimia Dasar (KIMD4110). Penelitian ini juga menganalisis faktor laten yang memengaruhi kepuasan peserta didik terhadap video pembelajaran interaktif mata kuliah Kimia Dasar (KIMD4110) dengan menggunakan analisis faktor.

1. Analisis Faktor

Analisis faktor merupakan salah satu teknik statistik multivariat yang digunakan untuk menentukan variabel-variabel mana yang dapat menjelaskan hubungan antara berbagai variabel bebas yang diobservasi (Tabachnick & Fidell, 2013). Analisis ini juga bertujuan untuk mereduksi variabel amatan yang secara keseluruhan menjadi beberapa variabel atau dimensi baru, walaupun demikian dimensi baru yang dihasilkan tetap dapat mewakili variabel utama. Pengelompokan variabel dilakukan dengan cara pengukuran korelasi pada sekumpulan variabel dan selanjutnya variabel-variabel yang memiliki korelasi tinggi dimasukkan ke dalam satu faktor, sedangkan variabel-variabel lain yang mempunyai korelasi yang relatif lebih rendah ditempatkan pada suatu faktor yang lain.

Misalkan suatu vektor acak X dan p komponen dengan rataan serta matriks kovarians Σ, maka model umum analisis faktor adalah sebagai berikut:

$$X_1 - \mu_1 = l_{11}F_1 + l_{12}F_2 + \ldots + l_{1m}F_m + \varepsilon_1 \qquad (1)$$

$$X_2 - \mu_2 = l_{21}F_1 + l_{22}F_2 + \ldots + l_{2m}F_m + \varepsilon_2$$
$$\vdots$$
$$\vdots$$
$$X_p - \mu_p = l_{p1}F_1 + l_{p2}F_2 + \ldots + l_{pm}F_m + \varepsilon_p$$

Bila dalam suatu notasi matriks dapat dituliskan sebagai berikut

$$\mathbf{X}_{(\mathbf{p}\times\mathbf{1})} - \boldsymbol{\mu}_{(\mathbf{p}\times\mathbf{1})} = \mathbf{l}_{(\mathbf{p}\times\mathbf{m})}\ \mathbf{F}_{(\mathbf{m}\times\mathbf{1})} + \boldsymbol{\varepsilon}_{(\mathbf{p}\times\mathbf{1})} \quad (2)$$

Koefisien l_{ij} merupakan loading dari peubah ke-*i* pada faktor ke-*j*, matriks muatan faktor disebut matriks *L*. Model faktor berimplikasi tertentu terhadap hubungan kovariansi yaitu:

1. $E(F)=0,\ E(\varepsilon)=0$

   $Cov(F)=E(FF')=I$
2. $Cov(\varepsilon)=E(\varepsilon\varepsilon')=\psi=diag(\psi_1,\psi_2,\ldots,\psi_p)$
3. $Cov(\varepsilon,F)=E(\varepsilon,F)=0$

Hubungan matriks *L* dengan persamaan 2 yaitu merupakan model faktor umum dengan faktor *orthogonal*, sehingga pada rotasi matriks dapat dituliskan di bawah ini.

$$\underset{(p\times 1)}{\boldsymbol{X}} = \underset{(p\times 1)}{\boldsymbol{\mu}} + \underset{(p\times m)}{\boldsymbol{L}}\ \underset{(m\times 1)}{\boldsymbol{F}} + \underset{(p\times 1)}{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (3)$$

Dimana,

$\boldsymbol{\mu}$ = vektor rataan

$\boldsymbol{L}$ = matriks konstanta yang tidak diketahui nilainya atau *loading factor*

$\boldsymbol{F}$ = faktor umum atau *common factor*

$\boldsymbol{\varepsilon}$ = vektor unsur galat atau faktor khusus

Struktur kovariansi dari model faktor *orthogonal* adalah berikut ini:

1. $Cov(X) = LL' + \psi$ atau
   $var(X_i) = l_{2i} + \ldots + l_{2im} + \psi i$
   $cov(X_i, X_k) = l_{i1} l_{kl} + \ldots + l_{im} l_{km}$
2. $Cov(X, F) = L$ atau
   $cov(X_i, F_j) = l_{ij}$

Dengan pembuktian struktur kovariansi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Cov(X - \mu) &= cov(LF + \varepsilon) \\ &= cov(LF) + cov(\varepsilon) + 2cov(LF + \varepsilon) \\ &= L\,cov(F)L' + \psi + 2L\,cov(LF + \varepsilon) \\ &= LL' + \psi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Cov(X, F) &= cov(LF + \varepsilon ; F) \\ &= cov(LF ; F) + cov(\varepsilon ; F) \\ &= L\,cov(F) \\ &= L \text{ (korelasi antara } X \text{ dengan faktor)} \end{aligned}$$

Sehingga model linear pada faktor umum adalah $(X - \mu) = LF + \varepsilon$. Bagian dari $Var(Xi)$ yang dapat diterangkan oleh *m* faktor umum yang disebut *communality* ke-*i*, sedangkan bagian-bagian dari $Var(Xi)$ yang merupakan faktor spesifik disebut *uniqueness* atau keragaman spesifik (*spesific varians*) ke-*i*. Sehingga variansinya dapat ditulis sebagai berikut:

$$\sigma ii = l_{i1}^2 + l_{i2}^2 + l_{i3}^2 + \ldots + l_{ij}^2 + \psi i = h_i^2 + \psi i \qquad (4)$$

dimana, l_{ij} merupakan *loading factor*, h_i^2 *communality* ke-*i*, dan keragaman spesifik ke-*i*.

Nilai *loading* menunjukkan adanya korelasi antara faktor umum yang terbentuk dengan variabel asal, semakin besar suatu nilai *loading* maka semakin erat hubungan diantara

keduanya. Nilai minimal *loading* yang digunakan adalah lebih besar dari $\pm 0.30, \pm 0.40$ dianggap penting; dan ± 0.50 atau lebih besar dinyatakan signifikan.

2. Proses Analisis Faktor

Proses pembentukan analisis faktor adalah sebagai berikut (Shrestha, 2021):

a. Penentuan variabel-variabel yang akan dianalisis dan melakukan uji kelayakan variabel dengan uji validitas dan reliabilitas pada variabel awal.

b. Perhitungan matriks korelasi dengan menggunakan 3 cara yaitu uji *Measure of Sampling Adequacy* (MSA), *Barlett Test of Sphericity,* dan *Keiser Meyers Oklin* (KMO).

1) MSA digunakan untuk mengetahui apakah variabel-variabel tersebut telah memadai untuk dilakukan analisis lanjut. Kriteria pada nilai MSA dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. *Measure of Sampling* (MSA)

MSA	Kriteria
1	dapat diprediksi tanpa kesalahan oleh variabel lainnya
≥ 0,5	variabel tersebut masih dapat diprediksi dan bisa dianalisis lebih lanjut
0-<0,5	variabel tersebut tidak dapat dianalisis lebih lanjut

2) *Barlett Test of Sphericity* digunakan untuk mengetahui matriks korelasi yang terbentuk adalah matriks identitas atau tidak, cara ini untuk menunjukkan bahwa variabel-variabel tersebut tidak berkorelasi dan begitupun sebaliknya, dengan tahapan pengujian seperti di bawah ini.
H_0 : Matriks korelasi merupakan matriks identitas
H_1 : Matriks korelasi bukan merupakan matriks identitas

Statistika uji: $\chi^2 = -\left[(n-1) - \frac{(2p+5)}{6}\right] ln|R|$ (5)

Pengambilan keputusan:
Tolak H_0 bila nilai $\chi^2 > \chi^2_{\alpha,P(p-1)/2}$.

3) *Keiser Meyers Oklin* (KMO) digunakan untuk menentukan ketepatan penggunaan analisis faktor dan persamaan KMO dapat dituliskan sebagai berikut:

$$KMO_j = \frac{\sum_{i \neq j} R_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} R_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} U_{ij}^2} \quad (6)$$

Dimana,
koefisien korelasi sederhana
koefisien korelasi parsial

Kriteria KMO dalam pemakaian analisis faktor bervariasi dengan nilai berada pada rentang 0 hingga 1. Nilai KMO antara 0,8 hingga 1,0 menunjukkan bahwa pengambilan sampel memadai, nilai antara 0,7 hingga 0,79 menunjukkan kriteria sedang, nilai antara 0,6 hingga 0,69 menunjukkan biasa-biasa saja, nilai kurang dari 0,6 menunjukkan pengambilan sampel tidak memadai dan tindakan perbaikan harus diambil. Jika nilainya kurang dari 0,5 maka hasil analisis faktor dapat dipastikan tidak terlalu baik untuk dianalisis data (Tabachnick, B. G., & Fidell, 2013).

c. Terdapat 2 prosedur dalam pembentukan faktor yang digunakan untuk mendapatkan bentuk yang mendasari hubungan antar variabel; adalah sebagai berikut:

1) *Principal components factoring* (PCF) dengan rotasi *orthogonal* merupakan analisis yang digunakan untuk menguji total *variance* suatu data dan umumnya digunakan untuk mereduksi item-item.

2) *Principal axis factoring* (PAF) digunakan untuk menguji hanya *common variance*, biasanya digunakan untuk mengidentifikasi *underlying* dimensi.

Kriteria-kriteria yang digunakan dalam menentukan jumlah faktor yang terbentuk, yaitu

1) Nilai Eigen (*eigenvalue*)
Nilai eigen atau akar ciri merupakan metode yang umum digunakan dalam menentukan faktor karena setiap variabel memiliki kontribusi nilai 1 terhadap total eigen maka faktor yang memiliki nilai eigen ≥ 1 adalah signifikan, hal ini menunjukkan varians yang lebih umum sebaliknya, bila faktor yang memiliki nilai eigen < 1 maka tidak signifikan dan dikeluarkan dari model.

2) Persentase variansi atau keragaman
Berdasarkan persentase keragaman, jumlah faktor dapat dilihat dari nilai spesifik persentase kumulatif keragaman, bila dalam bidang penelitian ilmiah batas total keragaman harus mencapai 95%, sedangkan dalam bidang sosial batas keragaman harus mencapai sebesar 60%.

3) *Scree Plot*
Scree plot digunakan untuk memplotkan jumlah faktor (sumbu *x*) dengan akar ciri (sumbu *y*) dan dari hasil plot yang terbentuk, dilihat bila kurva semakin melandai maka ekstraksi faktor dihentikan, tujuan dari *scree plot* adalah untuk mengidentifikasi jumlah faktor optimum yang dapat diekstraksi (Hair et al., 1998).

d. Rotasi Faktor
Rotasi faktor digunakan untuk menginterpretasi faktor hasil analisis, terdapat 2 metode dalam rotasi faktor yaitu *Oblique dan Orthogonal.* Faktor-faktor yang terbentuk pada rotasi *orthogonal* diasumsikan saling bebas, dengan rotasi sudut 90 antar sumbu kedua faktor umum. Sedangkan pada rotasi *oblique* tidak diharuskan dengan sudut 90.

Rotasi orthogonal dengan *variance of maximum (varimax) umumnya disarankan oleh beberapa ahli karena menghasilkan* bentuk faktor yang lebih sederhana, yaitu dengan cara memaksimumkan jumlah varians pada faktor yang memuat nilai *loading* kuadrat.

e. Menghitung skor faktor
Menaksir nilai *loading atau skor faktor yaitu* untuk menetapkan variabel-variabel yang akan menyusun faktor.Terdapat 2 metode yang digunakan dalam menaksir nilai *loading* yaitu *principal component analysis (PCA)*/analisis komponen utama dan metode *maximum likelihood*. Dari 2 metode tersebut, metode analisis komponen utama merupakan metode yang umum digunakan dalam menaksir nilai *loading*.

METODE

Penelitian ini dilakukan di UT dengan menggunakan pendekatan kuantitatif. Responden penelitian merupakan peserta didik yang mengambil mata kuliah Kimia Dasar (KIMD4110). Pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan link dari kuesioner online yang ditautkan pada aplikasi elearning UT mata kuliah Kimia Dasar (KIMD4110) pada bulan April-Juni 2022. Survei berbasis web dikembangkan untuk menilai tingkat kesesuaian video pembelajaran interaktif yang telah dibuat oleh UT dengan menggunakan skala Likert 5 poin yang terdiri dari sangat tidak setuju, tidak setuju, netral, setuju, dan sangat setuju.

Total responden yang terkumpul dan telah memberi tanggapan terhadap survei ini berjumlah 120. Penelitian terdiri dari 20 variabel dan detail karakteristik data dapat dilihat di Tabel 2. Setelah data terkumpul maka dilakukan analisis statistika deskriptif dan inferensia, untuk statistika inferensia yaitu menggunakan analisis faktor. Analisis statistika deskriptif digunakan untuk menganalisis hasil penelitian tentang persepsi peserta didik terhadap video pembelajaran interaktif; dan, analisis faktor digunakan untuk membentuk faktor laten yang memengaruhi kepuasan peserta didik terhadap video pembelajaran interaktif mata kuliah Kimia Dasar (KIMD4110).

Tabel 2. Karakteristik Data

Indikator	Variabel	Skala Pengukuran	Kategori
1	Konten		
2	Tujuan		
3	Penggunaan		
4	Harapan		
5	Umpan Balik		
6	Interaksi		
7	Motivasi Belajar	Ordinal	1 = Sangat tidak setuju
8	Kolaboratif		2 = Tidak setuju
9	Studi Kasus		3 = Netral
10	Refleksi		4 = Setuju
11	Aplikasi		5 = Sangat setuju
12	Ukuran Video		
13	Huruf		
14	Bahasa		
15	User Friendly		
16	Kemudahan Akses		
17	Menu		
18	Informasi		
19	Kemandirian		
20	Materi		

Tabel 3. Kelas interval dan kriteria

Kriteria	Skor
Sangat Tidak Setuju	1
Tidak Setuju	2
Netral	3
Setuju	4
Sangat Setuju	5

Berdasarkan kelas interval dan kriteria pada tabel 3, maka interval dari kriteria penilaian rata-rata adalah sebagai berikut:

$$\text{Interval} = \frac{\text{range tertinggi-range terendah}}{\text{jumlah kriteria}} = \frac{5-1}{5} = 0{,}8$$

dari hasil perhitungan interval tersebut dihitung panjang interval dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 4. Kriteria Penilaian

Kelas interval			Kriteria
1,00	-	1,79	Sangat Buruk
1,80	-	2,59	Buruk
2,60	-	3,39	Cukup
3,40	-	4,19	Baik
4,20	-	5,00	Sangat Baik

3. Uji Validitas

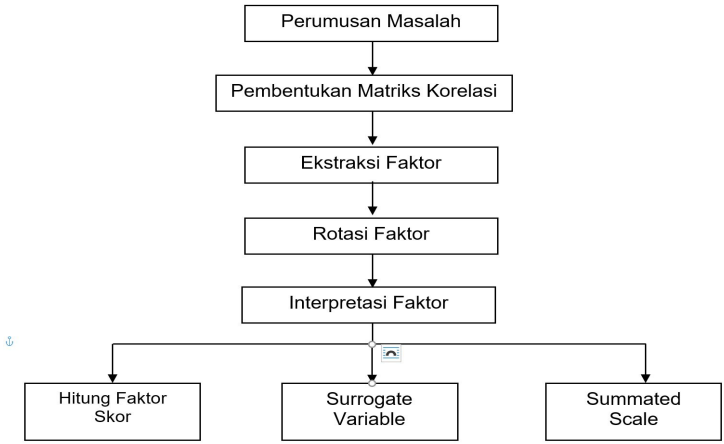
Uji validitas digunakan untuk mengetahui apakah instrumen pada penelitian yang digunakan adalah valid. Jika hasil uji dinyatakan valid maka instrumen tersebut dapat digunakan untuk mengukur variabel yang akan diukur. Hasil keputusan uji validitas yaitu bila $r_{hitung} > r_{tabel}$, maka kesimpulannya adalah butir tersebut valid dan begitupun sebaliknya.

4. Uji Reliabilitas

Uji reliabilitas digunakan untuk menguji konsistensi sasaran yang diukur dengan rumus *alpha cronbach*. Rentang *alpha cronbach* berada di antara 0 dan 1, dan secara umum nilai *alpha cronbach* lebih besar 0,7 $(\alpha > 0{,}7)$ dianggap dapat diterima dan bila nilai α bernilai tinggi maka menunjukkan item dalam penelitian tersebut sangat berkorelasi (Shrestha, 2021).

5. Diagram Alir Analisis Faktor

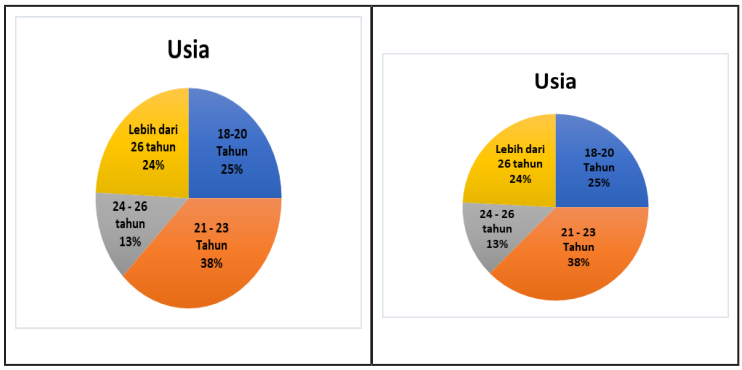
Di bawah ini merupakan diagram alir pada analisis faktor sebagai berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Analisis Faktor

PEMBAHASAN

Berikut ini merupakan hasil analisis data lapangan statistika deskriptif yang menggambarkan kriteria peserta didik berdasarkan program studi (Prodi) dan usia peserta yang mengambil mata kuliah Kimia Dasar (KIM4110).



Gambar 2. Statistika Deskriptif Peserta Didik Berdasarkan Prodi dan Usia

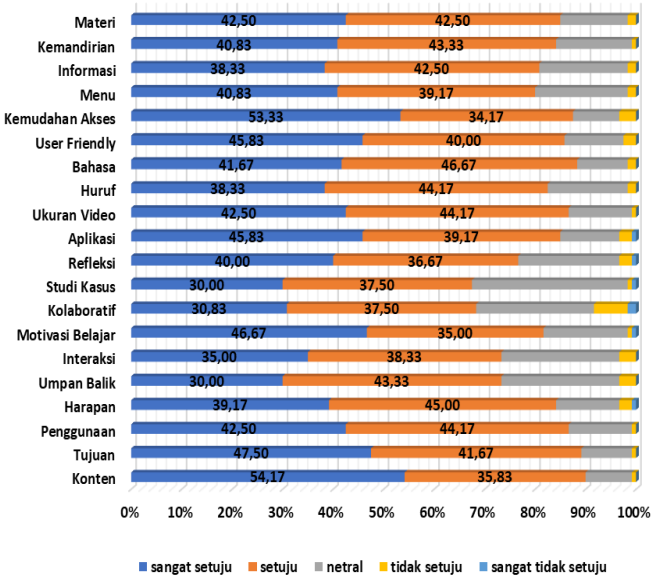
Berdasarkan Gambar 2, Prodi Teknologi Pangan merupakan Prodi yang paling banyak mengikuti kegiatan tutorial *online* pada mata kuliah Kimia Dasar (KIMD4110) dengan jumlah persentase sebesar 50,83%, hal ini dikarenakan mata kuliah tersebut merupakan mata kuliah inti prodi Teknologi Pangan, kemudian diikuti oleh prodi Agribisnis 17,50%, Biologi 15,00%, dan lainnya 16,67%. Sedangkan berdasarkan kategori usia pada hasil *pie chart,* responden yang mengikuti tutorial online pada mata kuliah Kimia Dasar didominasi peserta didik yang berusia 21-23 tahun sebesar 38%.

Tabel 5. Kriteria Indikator Berdasarkan Nilai Rata-Rata

No	Kriteria	Rata-rata
1	Konten	4,43
2	Tujuan	4,36
3	Penggunaan	4,28
4	Harapan	4,19
5	Umpan Balik	4,00
6	Interaksi	4,05

No	Kriteria	Rata-rata
7	Motivasi Belajar	4,26
8	Kolaboratif	3,89
9	Studi Kasus	3,95
10	Refleksi	4,13
11	Aplikasi	4,27
12	Ukuran Video	4,28
13	Huruf	4,19
14	Bahasa	4,28
15	User Friendly	4,29
16	Kemudahan	4,38
17	Menu	4,19
18	Informasi	4,18
19	Kemandirian	4,24
20	Materi	4,26
Rata-rata		4,21

Tabel 5 menunjukkan bahwa dari 20 indikator, rata-rata peserta didik memberikan apresiasi yang baik terhadap 9 indikator dalam video pembelajaran matakuliah Kimia Dasar (KIM4110) yaitu kolaboratif, studi kasus, umpan balik, interaksi, refleksi, informasi, harapan, huruf, dan menu. Selebihnya yaitu 11 indikator, rata-rata peserta didik memberikan apresiasi yang sangat baik terhadap indikator tersebut, yaitu kemandirian, motivasi belajar, materi, aplikasi, penggunaan, ukuran video, bahasa, *user friendly*, tujuan, kemudahan, konten. Selain itu berdasarkan 20 indikator secara keseluruhan didapatkan rata-rata sebesar 4,21. Hasil ini menunjukkan bahwa rata-rata semua indikator tersebut diapresiasi sangat baik oleh para peserta didik.



Gambar 3. Distribusi Frekuensi Respon Peserta Didik Terhadap Video Interaktif Mata Kuliah Kimia Dasar (KIMD4110)

Gambar 3 menunjukkan bahwa 15 dari 20 indikator persepsi peserta didik terhadap interaktivitas video pembelajaran mata kuliah Kimia Dasar (KIMD4110), peserta didik memberikan apresiasi setuju dan sangat setuju dengan persentase lebih dari 80%, sedangkan sisanya yaitu 5 indikator lainnya berada pada persentase 67%-76%. Selanjutnya dilakukan uji validitas dan reliabilitas dengan hasil dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Uji Validitas

Variabel	R Hitung	Variabel	R Hitung
1	0,758	11	0,570
2	0,754	12	0,770
3	0,733	13	0,791
4	0,770	14	0,865
5	0,732	15	0,823
6	0,737	16	0,710
7	0,782	17	0,792
8	0,669	18	0,797
9	0,665	19	0,815
10	0,733	20	0,867

Tabel 6 menjelaskan bahwa uji validitas suatu data dinyatakan valid jika nilai $r_{hitung} > r_{tabel}$, diketahui nilai $r_{tabel}=r_{120-2=118}=$ 0,1793. Berdasarkan Tabel 6 nilai semua variabel memiliki nilai $r_{hitung} > r_{tabel}$, maka dapat disimpulkan bahwa ke 20 variabel tersebut dinyatakan valid.

Tabel 7. Uji Reliabilitas

Cronbach's Alpha	N of Variabels
0,959	20

Tabel 7 menjelaskan bahwa uji *relia*bilitas suatu data dinyatakan reliabel jika nilai *alpha* > 0,7. Pada Tabel 7 didapatkan bahwa nilai *alpha* = 0,959 > 0,7. Maka dapat disimpulkan bahwa 20 variabel tersebut dinyatakan reliabel.

Tabel 8. KMO *and Bartlett's Test*

Kaiser Meyer Olkin Measure of Sampling Adequacy.		0,928
Bartlett's Test of Sphericity	*Approx. Chi-Square*	2174,201
	df	190
	Sig.	0,000

Tabel 8 menunjukkan bahwa uji kelayakan suatu variabel pada analisis faktor dilakukan dengan melihat hasil nilai KMO and *Bartlett's Test*. Pada Tabel 8 dapat dilihat bahwa nilai KMO = 0,928 > 0,5 dan *Bartlett's Test of Sphericity* (Sig.) 0,000 < 0,05 sehingga dapat disimpulkan teknik analisis faktor ini dapat dilanjutkan.

Tabel 9. Anti-*image Correlation*

Anti-image Correlation	**Nilai**	***Anti-image Correlation***	**Nilai**
Konten	0,908[a]	Aplikasi	0,905[a]
Tujuan	0,894[a]	Ukuran Video	0,921[a]
Penggunaan	0,942[a]	Huruf	0,966[a]
Harapan	0,919[a]	Bahasa	0,947[a]
Umpan Balik	0,915[a]	*User Friendly*	0,948[a]
Interaksi	0,925[a]	Kemudahan	0,912[a]
Motivasi Belajar	0,948[a]	Menu	0,918[a]
Kolaboratif	0,879[a]	Informasi	0,921[a]
Studi Kasus	0,928[a]	Kemandirian	0,948[a]
Refleksi	0,926[a]	Materi	0,949[a]

Hasil *anti image correlation* pada Tabel 9 digunakan untuk menentukan variabel yang layak digunakan dalam analisis faktor, yaitu dengan ketentuan bahwa nilai MSA yang dihasilkan > 0,5. Berdasarkan Tabel 9 didapatkan bahwa nilai MSA pada semua variabel > 0,5 sehingga dapat disimpulkan bahwa 20 variabel tersebut layak dilakukan dalam analisis faktor.

Tabel 10. *Communalities*

Variabel	*Extraction*	Variabel	*Extraction*
Konten	0,787	Aplikasi	0,641
Tujuan	0,777	Ukuran Video	0,838
Penggunaan	0,625	Huruf	0,730
Harapan	0,781	Bahasa	0,806
Umpan Balik	0,759	*User Friendly*	0,743
Interaksi	0,765	Kemudahan	0,752
Motivasi Belajar	0,693	Menu	0,841
Kolaboratif	0,845	Informasi	0,860
Studi Kasus	0,818	Kemandirian	0,720
Refleksi	0,770	Materi	0,793

Tabel 10 menunjukan bahwa semua variabel memiliki nilai *Extraction* > 0,5 sehingga dapat disimpulkan bahwa semua variabel dapat digunakan untuk menjelaskan faktor yang terbentuk. Semakin besar nilai *communalities* sebuah variabel, maka semakin erat hubungannya dengan faktor yang terbentuk.

Tabel 11. Total *Variance*

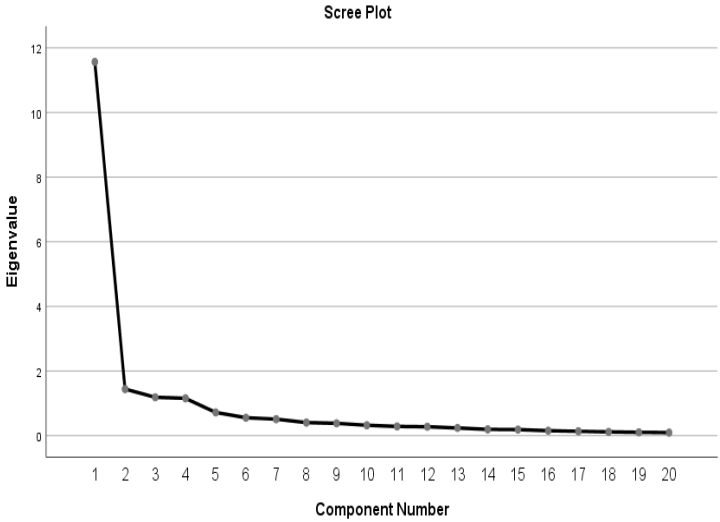
Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	11,563	57,815	57,815	11,563	57,815	57,815	4,840	24,202	24,202
2	1,439	7,197	65,012	1,439	7,197	65,012	4,109	20,544	44,747
3	1,186	5,929	70,941	1,186	5,929	70,941	3,653	18,264	63,011
4	1,154	5,771	76,712	1,154	5,771	76,712	2,740	13,701	76,712
5	0,717	3,584	80,296						
6	0,553	2,767	83,063						

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
7	0,509	2,545	85,608						
8	0,404	2,020	87,628						
9	0,381	1,906	89,534						
10	0,320	1,599	91,133						
11	0,285	1,426	92,559						
12	0,275	1,373	93,933						
13	0,237	1,183	95,115						
14	0,194	0,969	96,084						
15	0,186	0,929	97,013						
16	0,153	0,764	97,777						
17	0,134	0,670	98,446						
18	0,114	0,572	99,019						
19	0,103	0,514	99,533						
20	0,093	0,467	100,000						

Tabel 11 menunjukkan bahwa faktor-faktor yang terbentuk dapat dilihat pada bagian varian intial *eigenvalues*. Jika faktor-faktor tersebut dijumlahkan maka akan menunjukkan jumlah banyaknya varibel yaitu 11,563 + 1,439 + 1,186 + 1,154 + 0,717 + 0,553 + 0,509 + 0,404 + 0,381 + 0,320 + 0,285 + 0,275 + 0,237 + 0,194 + 0,186 + 0,153 + 0,134 + 0,114 +0,103 + 0,093 = 20 variabel. Sedangkan jumlah banyaknya faktor yang terbentuk dapat dilihat pada *extraction sums of squared loadings,* yaitu terdapat 4 (empat) faktor antara lain 11,563, 1,439, 1,186, dan 1,154. Jadi, berdasarkan hasil tersebut didapatkan 4 (empat) faktor yang terbentuk dari 20 variabel yang akan dilakukan analisis.

Syarat menjadi sebuah faktor adalah jika nilai *eigenvalue* lebih besar dari 1 (>1). Nilai *eigenvalue* komponen 1 sebesar 11,563 maka >1 artinya komponen 1 menjadi faktor 1 dan mampu menjelaskan 57,815% variasi; komponen 2 sebesar 1,439 atau >1

sehingga menjadi faktor 2 dan dapat menjelaskan 7,197% variasi; komponen 3 sebesar 1,186 atau >1 maka menjadi faktor 3 dan mampu menjelaskan 5,929% variasi; serta komponen 4 sebesar 1,154 atau >1 maka menjadi faktor 4 dan mampu menjelaskan 5,771% variasi. Jika faktor 1, 2, 3, dan 4 dijumlahkan, maka faktor tersebut mampu menjelaskan 76,712% variasi. Sedangkan nilai komponen 5,6,7, ..,20 tidak dihitung dikarenakan komponen tersebut memiliki nilai *eigenvalue* komponen < 1 maka tidak menjadi sebuah faktor yang terbentuk.



Gambar 4. *Scree Plot*

Pada Gambar 4 hasil *scree plot* menunjukkan bahwa jumlah faktor yang terbentuk adalah 4 (empat) titik komponen yang memiliki nilai *Eigenvalue* >1, sehingga terdapat 4 (empat) faktor yang dapat terbentuk dalam data.

Tabel 12. *Rotated Komponen Matrix*

Variabel	Komponen			
	1	2	3	4
Konten	0,792	0,315	0,097	0,227
Tujuan	0,802	0,237	0,152	0,232
Penggunaan	0,641	0,217	0,358	0,197
Harapan	0,777	0,160	0,350	0,170
Umpan Balik	0,366	0,093	0,737	0,271
Interaksi	0,579	-0,007	0,598	0,269
Motivasi Belajar	0,678	0,342	0,240	0,241
Kolaboratif	0,230	0,198	0,168	0,851
Studi Kasus	0,279	0,106	0,225	0,824
Refleksi	0,258	0,358	0,210	0,728
Aplikasi	0,085	0,776	0,139	0,110
Ukuran Video	0,290	0,811	0,173	0,257
Huruf	0,430	0,658	0,296	0,157
Bahasa	0,503	0,589	0,413	0,189
User Friendly	0,402	0,611	0,404	0,212
Kemudahan	0,146	0,513	0,680	0,076
Menu	0,206	0,433	0,753	0,209
Informasi	0,262	0,342	0,795	0,204
Kemandirian	0,504	0,574	0,268	0,253
Materi	0,593	0,515	0,292	0,302

Pada Tabel 12 dapat dijelaskan bahwa 20 variabel di atas terbagi menjadi 4 kelompok faktor dengan pembagian kelompok adalah sebagai berikut:

1. Kelompok faktor 1, memiliki korelasi yang kuat dan positif dengan variabel konten, tujuan, penggunaan, harapan, dan motivasi belajar. Sedangkan untuk variabel materi

memiliki korelasi sedang dan positif. Faktor ini dapat dinamakan dengan faktor konten materi.

2. Kelompok faktor 2, memiliki korelasi yang kuat dan positif dengan variabel aplikasi, ukuran video, huruf, dan user friendly. Sedangkan untuk variabel bahasa dan kemandirian memiliki korelasi sedang dan positif. Faktor ini dapat dinamakan dengan faktor aksesibilitas.
3. Kelompok faktor 3, memiliki korelasi yang kuat dan positif dengan variabel umpan balik, kemudahan, menu, dan informasi. Sedangkan untuk variabel interaksi memiliki korelasi sedang dan positif. Faktor ini dapat dinamakan dengan faktor aktivitas.
4. Kelompok faktor 4, memiliki korelasi yang kuat dan positif dengan variabel kolaboratif, studi kasus, dan refleksi. Faktor ini dapat dinamakan dengan faktor kolaborasi.

Tabel 13. Komponen *Transformation Matrix*

Komponen	1	2	3	4
1	0,591	0,520	0,487	0,380
2	0,445	-0,691	-0,214	0,528
3	-0,024	0,502	-0,787	0,358
4	-0,673	-0,019	0,313	0,670

Tabel 13 menunjukkan nilai korelasi secara berurutan pada komponen 1, 2, 3, dan 4 adalah 0,591; 0,691; 0,787; 0,670. Karena ke 4 (empat) komponen tersebut memiliki nilai korelasi > 0,5 maka ke 4 faktor yang terbentuk layak merangkum ke 20 variabel yang dianalisis. Langkah selanjutnya adalah membentuk model persamaan faktor, dengan nilai rata-rata dari masing-masing peubah adalah sebagai berikut:

$\mu_1 = 4,43$ $\mu_2 = 4,36$ $\mu_3 = 4,28$ $\mu_4 = 4,19$ $\mu_5 = 4,00$

$\mu_6 = 4,05$ $\mu_7 = 4,26$ $\mu_8 = 3,89$ $\mu_9 = 3,95$ $\mu_{10} = 4,13$

$\mu_{11} = 4,27$ $\mu_{12} = 4,28$ $\mu_{13} = 4,19$ $\mu_{14} = 4,28$ $\mu_{15} = 4,29$

$\mu_{16} = 4,38$ $\mu_{17} = 4,19$ $\mu_{13} = 4,19$ $\mu_{19} = 4,24$ $\mu_{20} = 4,26$

Maka diperoleh persamaan faktor sebagai berikut:

$$X_1 = 4,43 + 0,792F1 + 0,315F2 + 0,097F3 + 0,227F4 + \varepsilon_1$$
$$X_2 = 4,36 + 0,802F1 + 0,237F2 + 0,152F3 + 0,232F4 + \varepsilon_2$$
$$X_3 = 4,28 + 0,641F1 + 0,217F2 + 0,358\ F3 + 0,197\ F4 + \varepsilon_3$$
$$X_4 = 4,19 + 0,777F1 + 0,160F2 + 0,350\ F3 + 0,170\ F4 + \varepsilon_4$$
$$X_5 = 4,00 + 0,366F1 + 0,093F2 + 0,737\ F3 + 0,271F4 + \varepsilon_5$$
$$X_6 = 4,05 + 0,579F1 - 0,007F2 + 0,598F3 + 0,269\ F4 + \varepsilon_6$$
$$X_7 = 4,26 + 0,678F1 + 0,342F2 + 0,240F3 + 0,241F4 + \varepsilon_7$$
$$X_8 = 3,89 + 0,230F1 + 0,198F2 + 0,168\ F3 + 0,851\ F4 + \varepsilon_8$$
$$X_9 = 3,95 + 0,279F1 + 0,106F2 + 0,225F3 + 0,824\ F4 + \varepsilon_9$$
$$X_{10} = 4,13 + 0,258F1 + 0,358F2 + 0,210F3 + 0,728\ F4 + \varepsilon_{10}$$
$$X_{11} = 4,27 + 0,085F1 + 0,776F2 + 0,139\ F3 + 0,110\ F4 + \varepsilon_{11}$$
$$X_{12} = 4,28 + 0,290F1 + 0,811F2 + 0,173F3 + 0,257\ F4 + \varepsilon_{12}$$
$$X_{13} = 4,19 + 0,430F1 + 0,658F2 + 0,296F3 + 0,157\ F4 + \varepsilon_{13}$$
$$X_{14} = 4,28 + 0,503F1 + 0,589F2 + 0,413F3 + 0,189F4 + \varepsilon_{14}$$
$$X_{15} = 4,29 + 0,402F1 + 0,611F2 + 0,404F3 + 0,212\ F4 + \varepsilon_{15}$$
$$X_{16} = 4,38 + 0,146F1 + 0,513F2 + 0,680\ F3 + 0,076\ F4 + \varepsilon_{16}$$
$$X_{17} = 4,19 + 0,206F1 + 0,433F2 + 0,753\ F3 + 0,209\ F4 + \varepsilon_{17}$$
$$X_{18} = 4,18 + 0,262F1 + 0,342F2 + 0,795F3 + 0,204\ F4 + \varepsilon_{18}$$
$$X_{19} = 4,24 + 0,504F1 + 0,574F2 + 0,268\ F3 + 0,253\ F4 + \varepsilon_{19}$$
$$X_{20} = 4,26 + 0,593F1 + 0,515F2 + 0,292\ F3 + 0,302F4 + \varepsilon_{20}$$

Berdasarkan model persamaan faktor yang telah terbentuk di atas, maka dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Persamaan (1), yaitu setiap kenaikan satu satuan faktor 1 yaitu faktor (konten materi) akan menaikkan konten (X_1) sebesar 0,792 dengan asumsi bahwa faktor 2 (aksesibilitas), faktor 3 (aktivitas), dan faktor 4 (kolaborasi) adalah konstan. Begitupun seterusnya untuk semua persamaan kecuali persamaan 6.
2. Persamaan (6), yaitu setiap kenaikan satu satuan faktor 2 yaitu faktor (aksesibilitas) akan menurunkan interaksi (X_6) sebesar 0,007 dengan asumsi bahwa faktor 1 (konten materi), faktor 3 (aktivitas), dan faktor 4 (kolaborasi) adalah konstan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penerapan analisis faktor dalam membentuk faktor laten yang memengaruhi kepuasan peserta didik matakuliah Kimia Dasar (KIMD4110) terhadap video pembelajaran interaktif, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Rata-rata peserta didik memberikan apresiasi yang sangat baik terhadap keseluruhan indikator dalam video pembelajaran mata kuliah Kimia Dasar (KIMD4110). Sedangkan berdasarkan tingkat kepuasan, peserta didik memberikan apresiasi setuju dan sangat setuju sebesar lebih dari 80% pada 75% indikator.
2. Hasil dari analisis faktor didapatkan empat faktor laten yang memengaruhi kepuasan peserta didik terhadap video pembelajaran interaktif mata kuliah Kimia Dasar (KIMD4110) adalah sebagai berikut:
   a. Faktor konten materi
      Anggota faktor konten materi meliputi variabel konten, tujuan, penggunaan, harapan, motivasi belajar, dan materi.
   b. Faktor aksesibilitas
      Anggota faktor aksesibilitas meliputi variabel aplikasi, ukuran video, huruf, bahasa, user friendly, dan kemandirian.

c. Faktor aktivitas
Anggota faktor aktivitas meliputi variabel umpan balik, interaksi, kemudahan, menu, dan informasi.

d. Faktor kolaborasi
Anggota faktor kolaborasi meliputi variabel kolaboratif, studi kasus, dan refleksi.

DAFTAR PUSTAKA

Alawamleh, M., Al-Twait, L. M., & Al-Saht, G. R. (2022). The effect of online learning on communication between instructors and students during Covid-19 pandemic. *Asian Education and Development Studies*, *11*(2), 380–400. https://doi.org/10.1108/AEDS-06-2020-0131

Beheshti, M., Taspolat, A., Kaya, O. S., & Sapanca, H. F. (2018). Characteristics of instructional videos. *World Journal on Educational Technology: Current Issues*, *10*(2), 79–87. https://doi.org/10.18844/wjet.v10i2.3418

Dumford, A. D., & Miller, A. L. (2018). Online learning in higher education: exploring advantages and disadvantages for engagement. *Journal of Computing in Higher Education*, *30*(3), 452–465. https://doi.org/10.1007/s12528-018-9179-z

Febrianto, P. T., Mas'udah, S., & Megasari, L. A. (2020). Implementation of online learning during the covid-19 pandemic on Madura Island, Indonesia. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, *19*(8), 233–254. https://doi.org/10.26803/ijlter.19.8.13

Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L., & Black, W. C. (1998). *Multivariate data analysis* (5th ed.). N J: Prentice-Hall, Upper Saddle River.

Indrawari, C. D. S., Ninghardjanti, P., Wirawan, A. W., & Dirgatama, C. H. A. (2020). Archiving learning video design in vocational high school. *Journal of Physics: Conference Series*, *1446*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1446/1/012064

Riyana, C. (2007). *Pedoman Pengembangan Media Video*. P3AI UPI.

Shrestha, N. (2021). Factor Analysis as a Tool for Survey Analysis. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*, *9*(1), 4–11. https://doi.org/10.12691/ajams-9-1-2

Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2013). *Using Multivariate Statistics* (6th ed.). Boston, MA: Pearson.

Triana, Y., & Aisyah, S. (2021). Tutor Performance On Face-To-Face Tutorial In The Perspective Of Upbjj Ut Banjarmasin. *Jurnal Pendidikan dan Pembelajaran Ilmu Pengetahuan Sosial*, *10*(2), 108–117.

Universitas Terbuka. (n.d.). *Universitas Terbuka*. Retrieved November 18, 2021, from ut.ac.id

Universitas Terbuka. (2021). *Katalog Sistem Penyelenggaraan Universitas Terbuka 2021/2022*. Universitas Terbuka.

Wardhana, Y. Y., & Muhammad, R. N. (2021). An Investigation of Video and Audio to Improve Students' Motivation in Learning Listening during Online Learning at Ban Pongneeb School, Thailand. *Journal of English Teaching, Literature, and Applied Linguistics*, *5*(1), 20. https://doi.org/10.30587/jetlal.v5i1.2156

02

SUSTAINABLE FOOD AND AGRICULTURE

TOPICS:

Sustainable Food Development
Postharvest Technology
Food Safety
Halal Food
Functional Food
Traditional Food
Food Entrepreneurship
Agricultural Supply Chain
Digitalization in Agribusiness

02 SUSTAINABLE FOOD AND AGRICULTURE

Dini Nur Hakiki, M. Rajih Radiansyah, Eko Yuliastuti E.S., Athiefah Fauziyyah, Rina Rismaya, Mutiara Ulfah, Rozana

Peranan Penanganan dan Teknologi Pascapanen dalam Mengurangi Kehilangan Pangan pada Komoditas Hortikultura

Athiefah Fauziyyah, Eko Yuliastuti E.S., Dini Nur Hakiki, Mohamad Rajih Radiansyah, Rina Rismaya, Mutiara Ulfah

Potensi Pangan Fungsional pada Makanan Tradisional Indonesia Berbasis Fermentasi

Eko Yuliastuti E.S., Athiefah Fauziyyah, Dini Nur Hakiki, Mohamad Rajih Radiansyah, Rina Rismaya, Mutiara Ulfah

Komoditas Umbi-Umbian debagai Alternatif Sumber Karbohidrat

Mutiara Ulfah, Eko Yuliastuti E. S., Athiefah Fauziyyah, Rina Rismaya, Dini Nur Hakiki, Mohamad Rajih Radiansyah

Potensi Tepung Umbi-Umbian Termodifikasi sebagai Alternatif Pengganti Terigu

Ariyanti Hartari

Inovasi Pengolahan Talas Beneng untuk Mendukung Keberagaman Konsumsi Pangan Masyarakat 5.0

Rina Rismaya, Iffana Dani Maulida, Eko Yuliastuti E.S., Dini Nur Hakiki, Athiefah Fauziyyah, Mutiara Ulfah, Mohamad Rajih Radiansyah

Potensi Tanaman Kelor dalam Pertanian Berkelanjutan dan Manfaatnya Sebagai Makanan Super

Adhi Susilo, Sazli Tutur Risyahadi

Pendidikan Kewirausahaan Produk Pangan: Studi Kasus di Prodi Teknologi Pangan Universitas Terbuka

Nurmala Pangaribuan, Sri Maulidia Permatasari

Konservasi Lahan Bekas Galian C untuk Lahan Pertanian

PERANAN PENANGANAN DAN TEKNOLOGI PASCAPANEN DALAM MENGURANGI KEHILANGAN PANGAN PADA KOMODITAS HORTIKULTURA

THE ROLE OF POST-HARVEST HANDLING AND TECHNOLOGY IN REDUCING FOOD LOSS IN HORTICULTURAL COMMODITIES

Dini Nur Hakiki[1*], Mohamad Rajih Radiansyah[1], Eko Yuliastuti Endah Sulistyawati[1], Athiefah Fauziyyah[1], Rina Rismaya[1], Mutiara Ulfah[1], Rozana[2]

[1]Program Studi Teknologi Pangan, Jurusan Pertanian, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
[2]Program Studi Agroindustri Pangan, Jurusan Agribisnis, Politeknik Negeri Sambas

*dini-hakiki@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Buah dan sayur yang telah dipanen tidak semuanya dapat sampai ke meja makan. Diperkirakan lebih dari 20% buah dan sayur mengalami kehilangan pangan (food loss). Komoditas buah dan sayur merupakan komoditas kedua terbesar di dunia yang mengalami kehilangan pangan. Kehilangan pangan merupakan seluruh bagian pangan yang dibuang, dibakar, dan tidak dapat dimanfaatkan lagi untuk proses pengolahan selanjutnya. Karakteristik komoditas hortikultura yang mudah rusak membuat komoditas ini rentan mengalami kehilangan pangan. Kehilangan pangan dapat terjadi akibat proses penanganan dan penggunaan teknologi yang kurang tepat pada saat di lahan, pengemasan, penyimpanan, dan transportasi. Selaras dengan society 5.0 yang menyeimbangkan antara perkembangan ekonomi (kebutuhan pangan) dengan resolusi permasalahan sosial (seperti dampak terhadap lingkungan dan kualitas sumber daya manusia), maka dalam bidang penyediaan pangan, konsep keberlanjutan dilakukan dengan memaksimalkan hasil produksi (output) dan juga dengan meminimalisir kehilangan. Upaya yang dapat dilakukan untuk menekan kehilangan pangan adalah dengan penanganan dan

penggunaan teknologi pascapanen yang tepat. Penanganan yang tepat dapat dilakukan mulai dari tahapan pemanenan, pra pendinginan, sortasi dan grading, pengemasan, penyimpanan, serta transportasi. Sedangkan pada penggunaan teknologi yang tepat dapat diterapkan dengan penyimpanan dingin dan modified atmosphere packaging.

Kata Kunci: *hortikultura, kehilangan pangan, penanganan, teknologi pascapanen.*

ABSTRACT

Not all of the fruits and vegetables that have been harvested can reach the dinner table. It is estimated that more than 20% of fruits and vegetables experience food loss. Fruit and vegetable commodities are the second largest commodity in the world experiencing food loss. Food loss is all parts of food that are thrown away, burned, and cannot be used again for further processing. The perishable characteristics of horticultural commodities make these commodities vulnerable to food loss. Food loss can occur due to improper handling and use of technology at the time of land, packaging, storage, and transportation. In line with society 5.0 which balances economic development (food needs) with the resolution of social problems (such as the impact on the environment and the quality of human resources), in the field of food supply, the concept of sustainability is carried out by maximizing production (output) and also by minimizing losses. . Efforts that can be made to reduce food loss are by handling and using appropriate postharvest technology. Proper handling can be done starting from the stages of harvesting, pre-cooling, sorting and grading, packaging, storage, and transportation. While the use of the right technology can be applied with cold storage and modified atmosphere packaging.

Keywords: *horticulture, food loss, handling, postharvest technology.*

PENDAHULUAN

Buah dan sayur termasuk dalam komoditas hortikultura yang menyumbang peran penting sebagai sumber gizi bagi masyarakat. Di tengah kondisi pandemi ini, konsumsi buah dan sayur di masyarakat terus meningkat (Herianto, Lala, & Nurpasila, 2021). Buah dan sayur kaya akan kandungan vitamin dan mineral serta memiliki fungsi sebagai antioksidan yang dapat meningkatkan imunitas tubuh. Sayangnya buah dan sayur ini memiliki karakteristik yang mudah rusak. Tidak semua buah dan sayur yang telah dipanen dapat sampai ke meja makan. Sebagian akan mengalami kerusakan dan busuk, sebelum sampai ke tangan konsumen. Menurut data FAO (2019), diperkirakan lebih dari 20% buah dan sayur mengalami kehilangan pangan (*food loss*). Kehilangan tersebut dapat terjadi mulai dari pemanenan, penyimpanan, pendistribusian, hingga pengolahan. Di Indonesia sendiri, berdasarkan kajian dari Bappenas (2021) komoditas hortikultura memiliki proporsi kehilangan yang besar hingga mencapai 31,8%. Sayur-sayuran merupakan jenis komoditas hortikultura yang paling tidak efisien dimana kehilangannya mencapai 62,8% dari seluruh suplai domestik sayur-sayuran yang ada di Indonesia.

Di satu sisi, seiring terus meningkatnya penduduk di dunia, akan berakibat semakin tingginya permintaan pangan. Populasi manusia diperkirakan akan terus meningkat hingga mencapai 9,7 miliar pada tahun 2050 (United Nation, 2019), yang bila tidak diimbangi dengan ketersediaan pangan maka dapat menyebabkan kerawanan pangan *(food insecurity*). Berdasarkan data FAO diketahui bahwa pada tahun 2020 jumlah orang yang terkena dampak kelaparan semakin meningkat dan diperparah dengan adanya pandemi Covid-19. Prevalensi kekurangan gizi juga mengalami kenaikan dari 8,4% pada tahun 2019 menjadi sekitar 9,9% di tahun 2020, setelah hampir tidak berubah dari tahun 2014 hingga 2019. Tanpa adanya skenario untuk mempercepat kerawanan pangan dan kekurangan gizi, maka diperkirakan lebih dari 660 juta penduduk mungkin menghadapi kelaparan pada tahun 2030 (FAO, 2021).

Di sisi lain, tantangan untuk meningkatkan ketersediaan pangan semakin besar mulai dari terjadinya degradasi sumber daya alam, penurunan keanekaragaman hayati, perubahan iklim, dan penyebaran hama dan penyakit tanaman (FAO, 2017). Oleh karena itu, untuk menjamin ketersediaan pangan tidak hanya fokus untuk meningkatkan faktor produksi namun juga bagaimana menurunkan kehilangan pangan. Kehilangan pangan ini menjadi masalah dunia dan termasuk dalam 17 tujuan global yang tersusun dalam agenda pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*) yaitu terjaminnya pola produksi dan konsumsi yang berkelanjutan. Pada tahun 2030, target pembangunan berkelanjutan adalah mengurangi separuh limbah makanan global per kapita di tingkat ritel dan konsumen serta mengurangi kehilangan makanan di sepanjang rantai produksi dan pasokan, termasuk kehilangan pascapanen (United Nation, 2021).

Tujuan pembangunan berkelanjutan dapat tercapai dengan didukung adanya keseimbangan yang berusaha menyelaraskan antara perkembangan ekonomi (kebutuhan pangan) dengan resolusi permasalahan sosial (seperti dampak terhadap lingkungan dan kualitas sumber daya manusia) agar dapat terintegrasi dengan baik (Faruqi, 2019). Prinsip keseimbangan ini tertuang dalam konsep *society* 5.0, konsep masyarakat super cerdas yang diperkenalkan pertama kali oleh Negara Jepang. Pada *society 5.0* diutamakan pembangunan yang dititikberatkan pada manusia (*human centered)*, terbuka, inklusif, dan keberlanjutan (*sustainable*) (Keogh et al., 2020). Di bidang penyediaan pangan, konsep keberlanjutan dilakukan dengan memaksimalkan hasil produksi (output) dan meminimalisir kehilangan produksi serta kerusakan lingkungan (FAO, 2021). Tulisan ini bertujuan untuk membahas mengenai kehilangan yang terjadi pada komoditas hortikultura khususnya untuk buah dan sayur, serta penanganan dan teknologi pascapanen yang digunakan untuk menekan kehilangan tersebut. Metode yang digunakan dalam tulisan ini adalah literatur review menggunakan sumber dari buku, jurnal, ataupun sumber lainnya.

PEMBAHASAN

1. Karakteristik Komoditas Hortikultura

Hortikultura berasal dari kata *hortus* yang artinya kebun dan *colere* adalah budidaya. Secara harfiah hortikultura adalah usaha membudidayakan tanaman buah-buahan, sayuran, dan tanaman hias. Secara garis besar, buah dan sayur mengandung komponen kimia yang terdiri dari air, karbohidrat, protein, vitamin dan mineral, serta sedikit lemak. Kandungan air buah dan sayur cukup tinggi berkisar antara 80-90%. Kandungan karbohidrat buah banyak dijumpai dalam bentuk fruktosa dan glukosa, sedangkan kandungan pati pada sayuran banyak ditemui pada sayuran yang berasal dari umbi. Kandungan protein dan asam amino pada buah dan sayur relatif rendah sehingga bukan merupakan sumber utama protein, namun buah dan sayur merupakan sumber vitamin dan mineral. Buah dan sayur mengandung sumber vitamin yang penting seperti vitamin A, C, dan B1 serta sumber mineral penting seperti kalsium dan besi. Komponen penting lainnya yang terdapat pada buah dan sayur adalah pigmen yang menyebabkan beragamnya warna buah dan sayur. Pigmen terdiri dari klorofil pembentuk warna hijau, karotenoid untuk warna kuning orange, dan juga flavanoid yang terdiri dari antosinin, antoxantin, dan tanin yang merupakan pigmen warna merah, kuning, dan biru (Muchtadi, 2020).

Setelah panen, komoditas hortikultura rentan mengalami kerusakan. Komoditas hortikultura ini dapat dikatakan masih "hidup" karena mengalami aktivitas metabolisme. Komoditas ini mengalami perubahan-perubahan fisikokimiawi yang berhubungan dengan metabolisme oksidatif akibat masih berlanjutnya kegiatan metabolisme setelah panen. Perubahan-perubahan ini disebabkan oleh respirasi (pengambilan O_2 dan pengeluaran CO_2) dan transpirasi (penguapan H_2O). Respirasi ini akan menyebabkan perubahan yang pada awalnya menguntungkan, seperti terjadinya perubahan warna, rasa, dan aroma, namun bila perubahan ini terus berlanjut dan tidak dikendalikan maka dapat merugikan karena bahan akan rusak/busuk dan tidak dapat dimanfaatkan sehingga dapat menyebabkan susut/kehilangan. Respirasi dapat memicu kerusakan fisiologis seperti pematangan, penuaan, pencoklatan, degradasi klorofil hingga pembusukan (Kandasamy, 2022).

Respirasi merupakan proses metabolisme yang melibatkan konsumsi oksigen untuk pemecahan bahan kompleks, seperti gula, pati menjadi molekul sederhana seperti CO_2, air, dan juga menghasilkan panas dan energi yang dapat digunakan oleh sel untuk melakukan reaksi sintesis. Reaksi respirasi dijelaskan dalam persamaan reaksi berikut.

$$C_6H_{12}O_6 + O_2 \rightarrow 6CO_2 + H_2O + \text{Energi}$$

Laju respirasi dinyatakan sebagai konsumsi oksigen (O_2) dan pengeluaran karbondioksida (CO_2) per satuan berat produk per satuan waktu. Pada proses respirasi juga dilepas energi dalam bentuk panas yang merupakan bagian energi yang tersimpan selama proses fotosintesis. Terdapat korelasi yang positif antara laju respirasi dengan panas yang dilepaskan. Semakin cepat laju respirasi, maka semakin besar pula jumlah panas yang dilepaskan per satuan waktu. Laju respirasi yang tinggi akan menyebabkan semakin cepatnya penurunan mutu komoditas dan umur simpan yang relatif singkat. Kecepatan respirasi merupakan ciri dari cepat tidaknya perubahan komposisi yang terjadi di dalam jaringan. Laju respirasi buah dan sayur merupakan petunjuk aktivitas metabolisme jaringan dan oleh karena itu berguna sebagai petunjuk lama penyimpanan buah dan sayur tersebut (Kandasamy, 2022).

Respirasi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti adanya luka, suhu, dan kelembaban. Luka yang terjadi pada komoditas hortikultura akan mempercepat laju respirasi sehingga dapat membuat komoditas hortikultura rentan mengalami kerusakan. Laju respirasi irisan apel meningkat sekitar 2-3 kali lipat dibandingkan dengan buah apel utuh (Lakakul, Beaudry, & Hernandez, 1999). Memar pada buah mangga gedong gincu mengakibatkan pola respirasi dan produksis etilen meningkat selama penyimpanan (Paramita, 2010). Luka juga menyebabkan jaringan akan mengalami "kejutan secara mekanis" (*mechanical shock)* yang dapat menghilangkan lapisan pelindung epidermal dalam jaringan sehingga akan membuat jaringan mudah terpapar kontaminasi dari luar (Saltveit, 2016).

Laju respirasi pada produk hortikultura segar sangat tergantung pada suhu (Fonseca, Oliveira, & Brecht, 2002). Menurut Pérez-López, Ramírez-Guzmán, Espinosa-Solares,

Aguirre-Mandujano, & Villaseñor-Perea (2020), suhu merupakan faktor eksternal penting yang mempengaruhi laju respirasi karena pada nilai ekstrim menyebabkan denaturasi enzim, yang secara signifikan mengubah laju respirasi. Reaksi biologis umumnya meningkat 2-3 kali lipat untuk setiap kenaikan suhu 10°C (Fonseca *et al.,* 2002); (Pérez-López *et al.,* 2020) dalam kisaran suhu yang biasanya ditemui dalam distribusi dan rantai pemasaran. Terjadinya penurunan kualitas akan sangat tinggi ketika buah ditangani pada suhu yang tidak optimal (Mukama, Ambaw, & Opara, 2020). Oleh karena itu produk yang dipanen harus seminimal mungkin terkena panas dan segera dibawa ke suhu penyimpanan optimal. Laju respirasi yang menunjukkan banyaknya aktivitas metabolisme jaringan serta laju penurunan kualitas produk yang disimpan, dapat ditekan melalui penurunan suhu penyimpanan hingga sedikit di atas suhu kritis produk tertentu. Menurut Zainalabidin, Sagrin, Wan Azmi, & Ghazali (2019) meskipun proses pendinginan selama penanganan pascapanen membantu mengurangi kerusakan akibat suhu tropis yang tinggi, suhu penyimpanan pendinginan juga dapat mengakibatkan kerusakan dingin (*chilling injury)* yang merugikan.

Suhu penyimpanan dan kelembaban relatif berpengaruh nyata terhadap laju respirasi sedangkan laju transpirasi sangat dipengaruhi oleh kelembaban relatif. Kelembaban relatif memainkan peran penting dalam kualitas produk dengan mempengaruhi hilangnya kelembaban. Kehilangan kandungan air terjadi karena defisit tekanan uap air yang dianggap sebagai fenomena fisik, serta karena respirasi yang dianggap sebagai fenomena fisiologis. Berkurangnya kelembapan dapat menyebabkan tekstur produk yang tidak diinginkan (Lentzou, Xanthopoulos, Templalexis, & Kaltsa, 2021).

2. Kehilangan Pangan

Kehilangan pangan (*food loss*) didefinisikan FAO sebagai penurunan kuantitas dan kualitas pangan akibat keputusan dan tindakan oleh pemasok dalam rantai pasok, tidak termasuk ritel penyedia jasa makanan, dan konsumen. Terminologi kehilangan pangan seringkali beririsan dengan limbah pangan (*food waste*). Limbah pangan merupakan penurunan kuantitas atau kualitas pangan akibat tindakan pengecer, jasa makanan,

dan konsumen. Bila kehilangan pangan terjadi pada tahap produksi, limbah pangan terjadi pada akhir rantai pasok pangan yaitu konsumsi eceran dan konsumen tingkat akhir. Kehilangan pangan seringkali dikaitkan dengan kegiatan pascapanen dengan sistem atau kapasitas infrastruktur yang kurang dan diindikasikan sebagai penyebab terjadinya susut, sedangkan limbah pangan lebih terkait dengan perilaku pengecer dan konsumen (FAO, 2019; Irianto & Giyatmi, 2021).

Kehilangan pangan yang relatif besar umumnya terjadi pada bahan pangan dalam bentuk masih segar seperti pada penanganan pascapanen sayuran dan buah, pascapanen gabah menjadi beras, tongkol jagung menjadi jagung pipil, dan lainnya. Limbah pangan terjadi pada tingkatan pangan siap diolah atau disajikan untuk keperluan dikonsumsi. Tempat yang berpotensi terjadi limbah pangan sudah dimulai pada saat bahan pangan diperjualbelikan di tingkat pasar pengecer hingga tiba di rumah konsumen. Bentuk dari limbah pangan seperti makanan yang disimpan terlalu lama di kulkas, misalnya bahan pangan terlalu lama di pasar (karena tidak ada yang membeli sehingga menjadi kadaluwarsa), atau bahan pangan yang tersisa di piring karena tidak dimakan seluruhnya (Kariyasa & Suryana, 2012).

Pada laporan FAO 2019 yang berjudul *Moving Forward in loss and waste reduction,* dijelaskan mengenai batasan tentang bahan yang dikategorikan sebagai *food loss* dan *food waste.* Bahan nabati dan hewani yang digunakan sebagai pangan, pakan, dan benih tidak dianggap sebagai kehilangan atau limbah pangan. Kehilangan dan limbah pangan juga tidak termasuk bahan nabati dan hewani yang tujuan awalnya untuk pangan kemudian dialihkan ke penggunaan non pangan. Sebagai contoh adalah pada pisang yang bagian kulit pisangnya tidak bisa dimakan kemudian diolah menjadi pakan ternak. Pada pisang yang telah berubah warna menjadi kecoklatan dan berbintik-bintik hitam yang tidak terjual di tingkat pedagang yang kemudian dikumpulkan dan didistribusikan kembali ke konsumen lain atau diolah sebagai pakan, juga tidak termasuk dalam kehilangan dan limbah pangan. Selain itu, kehilangan masa akibat pengolahan makanan misalnya karena pemanasan, pengeringan, dan fermentasi juga tidak termasuk dalam kehilangan atau limbah pangan. Jadi yang termasuk

dalam kehilangan pangan dan limbah pangan adalah bahan nabati dan hewani yang memang ditujukan untuk dikonsumsi (pangan) yang hilang secara kualitatif dan sengaja dibuang dan dialihkan ke tempat pembuangan akhir.

Jumlah kehilangan pangan didasarkan pada kuantitas semua tanaman, ternak, dan ikan yang dapat dimakan manusia secara langsung atau tidak langsung dari tahapan pascapanen/pemotongan/penangkapan rantai pasok yang dibuang, dibakar, dan tidak dapat dimanfaatkan untuk keperluan lain (seperti digunakan untuk pakan dan industri). Penentuan kehilangan ini tidak termasuk dalam tingkat retail. Pada penghitungan *food loss index* (FLI), terdapat 5 komoditas yang bernilai ekonomi tinggi yang digunakan dalam perhitungan yaitu serealia dan kacang-kacangan, sayur dan buah-buahan, umbi-umbian, hewan ternak, dan ikan. Penghitungan dilakukan dengan keterwakilan negara pada masing-masing benua Hasil yang didapatkan bahwa komoditas buah dan sayur merupakan komoditas kedua terbesar di dunia yang mengalami kehilangan pangan setelah komoditas umbi-umbian. Kehilangan komoditas sayur dan buah mencapai lebih dari 20%. Kehilangan ini terjadi di sepanjang proses pascapanen/pemotongan, penyimpanan transportasi, distribusi, pengolahan dan pengemasan (FAO, 2019). Berikut ini beberapa bahasan tentang kehilangan pangan yang meliputi kehilangan di lahan, kehilangan saat pengemasan dan penyimpanan, serta kehilangan saat transportasi.

a. Kehilangan di lahan (Pascapanen)

Kehilangan dapat terjadi pada saat di lahan antara lain disebabkan waktu panen yang tidak tepat serta praktek pemanenan dan penanganan yang kurang baik. Tingkat kematangan pemanenan merupakan faktor kritis dalam menentukan kualitas buah dan sayur. Petani sering terpaksa memanen sebelum waktunya untuk memenuhi kebutuhan yang mendesak (Mebratie, Haji, Woldetsadik, & Ayalew, 2015). Buah yang dipanen sebelum waktunya akan memiliki kualitas yang rendah, rentan terhadap gangguan fisiologis, dan memiliki masa simpan yang pendek dibanding dengan buah yang dipanen dalam waktu yang tepat (Arah, Amaglo, Kumah, & Ofori, 2015). Sebaliknya keterlambatan panen dapat menyebabkan daging

buah menjadi berserat, lembek karena terlalu matang sehingga cenderung mudah rusak.

Praktik pemanenan yang tidak tepat juga dapat menyebabkan kehilangan. Pemanenan yang dilakukan secara manual dengan menggunakan tongkat panjang dengan pengait di ujungnya (untuk buah-buahan) dan dengan cara menggali secara manual (untuk sayuran) dapat meningkatkan kehilangan karena adanya luka yang dapat menyebabkan kontaminasi mikroorganisme (Etefa, Forsida, & Kebede, 2022). Praktik umum yang dilakukan dalam pemanenan buah mangga adalah dengan cara menggoyang pohon/tanaman atau menunggu buah jatuh dari pohon akan menghasilkan buah yang belum matang dan buah yang rusak (Ridolfi, Hoffmann, & Baral, 2018).

b. Kehilangan saat pengemasan dan penyimpanan

Kemasan bulky yang banyak digunakan dalam komoditas hortikultura yaitu seperti peti kayu, keranjang, kantong plastik besar, dan karung. Penggunaan kemasan bulky seperti peti kayu yang terlalu besar hingga mencapai kapasitas 30-50 kg dapat menyebabkan komoditas pada bagian paling bawah peti akan mengalami kerusakan mekanis seperti memar dan hancur (Mebratie et al., 2015). Di beberapa negara, karung goni digunakan untuk mengemas komoditas seperti mangga dan alpukat. Penggunaan karung goni ini memiliki kelemahan yaitu ventilasinya kurang baik serta tidak dapat melindungi buah dari kerusakan mekanis ataupun tekanan (Etefa et al., 2022).

Kehilangan selama penyimpanan buah dan sayuran sangat bervariasi, sebagian karena perbedaan jenis buah dan sayuran yang dihasilkan di suatu wilayah. FAO (2019) melaporkan bahwa kejadian kehilangan selama penyimpanan di beberapa negara di Asia Tengah dan Selatan mencapai 0–5%. Komoditas apel, tomat, dan kembang kol adalah yang paling banyak mengalami kehilangan. Di Asia Timur dan Tenggara, tepatnya di Cina, komoditas Kubis mengalami kehilangan hingga 47,5%. Demikian pula, pada 14 pengamatan untuk Afrika sub-Sahara menunjukkan kehilangan sebesar 0,5–35% pada komoditas mangga dan tomat. Tingginya tingkat kehilangan pada komoditas-komoditas dikarenakan sifat alami buah dan sayuran tersebut yang sangat mudah rusak. Kondisi iklim terutama panas dan kelembaban juga dapat menyebabkan

kerusakan biologis (serangan dari bakteri, jamur atau serangga), terutama tanpa adanya penyimpanan dan transportasi yang tepat untuk mengontrol suhu dan kelembaban.

c. Kehilangan saat transportasi

Transportasi merupakan tahapan antara dalam rantai pasok pangan. Pada tahapan transportasi terjadi "*time gap*" antara berbagai tahap rantai pasokan pangan, dari produksi hingga konsumsi. *Time gap* ini meningkatkan risiko pada produk makanan terutama yang mudah rusak (*perishable*), dapat rusak atau hilang; misalnya karena panas atau dingin yang berlebihan, kerusakan dalam perjalanan, dan kontaminasi (Faqeerzada, Rahman, Joshi, Park, & Cho, 2018). Kehilangan pangan jenis buah dan sayuran pada transportasi secara signifikan lebih tinggi daripada jenis serealia dan kacang-kacangan. Adannya benturan (*shock*) dan getaran (*vibration*), beban tekanan pada buah (*stress*), varietas buah, tingkat kematangan buah, berat dan ukuran buah, karakteristik kulit buah, serta kondisi lingkungan selama transportasi merupakan faktor-faktor yang menyebabkan adanya kerusakan pada komoditas yang dibawa (Rozana, Perdana, & Sigiro, 2021).

Di Asia Tengah dan Selatan, dilaporkan kehilangan buah dan sayur pada transportasi mencapai 8–25%. Selama transportasi, infrastruktur fisik yang baik dan logistik perdagangan yang efisien adalah kunci untuk mencegah kerugian makanan (FAO, 2019). Jalan yang buruk yang dilalui truk selama proses transportasi dan suhu yang tinggi dalam truk serta komoditas yang dipanen dalam keadaan lewat matang menyebabkan kehilangan komoditas tomat di Afrika selatan (Ridolffi, Hoffman, & Baral, 2018).

Getaran selama transportasi sebagai akibat jalan yang begelombang merupakan salah satu penyebab utama kehilangan pascapanen bagi sebagian besar buah-buahan dan sayuran (Idah, Ajisegiri, & Yisa, 2007). Buah dan sayur sering dikemas dengan buruk atau tidak dikemas sama sekali, diangkut dengan truk terbuka tanpa pendingin, dan mengalami kerusakan mekanis karena kompresi, abrasi dan penanganan kasar selama operasi penanganan dan transportasi, sehingga membuat komoditas sangat rentan terhadap kerusakan (FAO, 2019). Di negara-negara berkembang, tidak adanya sarana transportasi

yang tepat, jalan yang buruk, dan manajemen logistik yang tidak efisien membuat komoditas mudah rusak dan tidak dapat dipertahankan mutunya dengan baik. Selain itu, operasi bongkar muat dilakukan oleh pekerja yang tidak terampil dan tidak berpendidikan yang umumnya tidak menangani produk dengan hati-hati. Hal ini menyebabkan kerusakan mekanis pada produk pertanian (Elik et al., 2019).

Selama transportasi, produk harus dikemas dan ditumpuk dengan tepat untuk menghindari gerakan atau getaran yang berlebihan. Penggunaan kantong plastik oleh petani dan pengangkut dalam penanganan buah cenderung meningkatkan suhu di dalam kantong kemudian menyebabkan kehilangan air dan respirasi yang tinggi, dan penurunan bobot sehingga harga per satuan berkurang. Selain itu, menempatkan banyak buah dalam kantong dapat meningkatkan panas yang menyebabkan kerusakan fisiologis (Zakaria, Rehema, Mariam, & Mtunguja, 2014). Tekanan (*compression*) yang diterima buah semakin bertambah jika isi kemasan terlalu penuh (*over packing*) dan penumpukan kemasan terlalu tinggi. Isi kemasan yang terlalu penuh maupun yang terlalu kurang (*under packing*) juga menjadi penyebab kerusakan fisik pada produk.

3. Penanganan Pascapanen yang Tepat untuk Menekan Kehilangan Pangan

a. Penanganan pascapanen yang sesuai

Penanganan pascapanen yang sesuai dimulai dari tahapan pemanenan, precooling, sortasi dan grading, pengemasan, penyimpanan, hingga transportasi.

1) Pemanenan

Penanganan fisik saat pemanenan dapat berdampak signifikan pada kualitas dan umur simpan sebagian besar buah dan sayuran yang dipanen. Misalnya, penanganan yang kasar saat panen dan setelah panen dapat menyebabkan kerusakan mekanis yang dapat mempengaruhi kualitas pascapanen dan umur simpan hasil panen (Arah et al., 2015). Oleh karena itu penting untuk diketahui praktik penanganan pascapanen yang sesuai yang diperlukan untuk mempertahankan kualitas dan memperpanjang umur simpan. Beberapa

praktik penanganan meliputi pemanenan, pendinginan awal, pembersihan dan desinfektan, penyortiran, dan pengkelasan (*grading*). Kematangan fisiologis buah pada saat panen memiliki efek penting pada kualitas pascapanen buah tersebut (Beckles, 2012). Oleh karena itu, harus diperhatikan saat memanen buah untuk mendapatkan kualitas terbaik. Umur simpan buah-buahan dan sayuran terdiri dalam tiga tahap yaitu pendewasaan, pematangan, dan penuaan. Tahap pendewasaan memberikan indikasi buah siap panen. Komoditas hortikultura rentan terhadap kerusakan mekanis selama pemanenan yang dapat menyebabkan umur simpan yang lebih pendek. Oleh karena itu, penanganan secara hati-hati saat pemanenan perlu dilakukan untuk menghindari memar atau luka yang dapat mempercepat kerusakan. Pemanenan buah juga harus dilakukan pada pagi atau sore hari untuk menghindari peningkatan panas lapang yang berlebihan (Nurhayati, Diniyah, & Kurniasari, 2018).

2) *Precooling*

Panas lapang merupakan hal yang tidak diinginkan pada tahap pemanenan dan harus dihilangkan secepat mungkin. Panas lapang yang berlebihan menimbulkan peningkatan aktivitas metabolisme yang tidak diinginkan sehingga pra pendinginan segera setelah panen menjadi sangat penting dilakukan. Pendinginan awal dapat meminimalkan efek aktivitas mikroba, aktivitas metabolisme, laju respirasi, dan produksi etilen (Shahi, Lohani, Chand, & Singh, 2012). Cara yang paling mudah untuk mendinginkan komoditas adalah dengan mengalirkan dengan air dingin (*hydrocooling*) yang juga dapat dicampur dengan desinfektan seperti thiabendazole dan sodium hipoklorit. Metode ini efektif untuk menurunkan panas lapang sekaligus untuk mengurangi jumlah mikroba yang terikut saat komoditas dipanen.

3) Sortasi dan grading

Salah satu tahapan yang paling penting dalam penanganan komoditas hortikultura adalah sortasi dan grading. Sortasi adalah memisahkan komoditas yang bertunas, rusak, atau berpenyakit dari komoditas yang

bagus dan bersih. Komoditas yang rusak dan berpenyakit dapat menghasilkan etilen dalam jumlah yang besar yang dapat mempengaruhi komoditas lain yang berdekatan. Grading merupakan proses mengkategorikan komoditas berdasarkan warna, ukuran, tingkat kematangan, dan lainnya. Baik sortasi dan grading berperan penting dalam menjaga kualitas maupun mempertahankan umur simpan komoditas. Pensortiran akan membatasi penyebaran mikroorganisme dari komoditas yang kurang sehat mengkontaminasi komoditas yang sehat selama pascapanen. Grading akan membantu mengkategorikan komoditas dalam parameter tertentu sehingga memungkinkan penanganan menjadi lebih mudah. Sebagai contoh grading berdasarkan warna atau tahap pematangan maka akan membantu menghilangkan komoditas yang terlalu matang sehingga mudah menghasilkan etilen yang dapat mempercepat pematangan komoditas lainnya (Arah, Ahorbo, Anku, Kumah, & Amagle, 2016).

4) Pengemasan

Pengemasan juga merupakan salah satu aspek penting untuk dipertimbangkan dalam mengatasi kehilangan pascapanen pada buah-buahan dan sayuran. Pengemasan bertujuan untuk melindungi dari kerusakan mekanis, dan kontaminasi dari sumber fisik, kimia, dan biologis (Prasad & Kochhar, 2014). Pengemasan sebagai praktik penanganan pascapanen dalam produksi buah dan sayur adalah penting dalam menempatkan produk ke dalam porsi yang cukup besar agar mudah penanganannya. Namun, penggunaan kemasan yang tidak sesuai dapat menyebabkan kerusakan buah yang mengakibatkan kehilangan. Beberapa jenis kemasan yang umum digunakan khususnya di negara berkembang seperti peti kayu, kardus, keranjang anyaman, plastik, peti, karung nilon, karung goni, dan karung plastik (Idah et al., 2007). Sebagian besar bahan kemasan yang disebutkan di atas tidak memberikan semua perlindungan yang dibutuhkan oleh komoditas. Sementara itu sebagian besar bahan kemasan tersebut seperti karung nilon tidak memberikan aerasi yang cukup bagus sehingga

dapat menyebabkan terjadinya akumulasi panas akibat respirasi.

Peti kayu dan keranjang anyaman bambu adalah beberapa bahan kemasan umum yang digunakan di banyak negara. Kekurangan peti kayu yaitu adanya tumpukan yang berlebih dapat menciptakan banyak gaya tekan pada komoditas yang terletak di dasar peti (Hurst, 2010). Gaya tekan yang tidak diinginkan ini menyebabkan luka yang pada akhirnya mengakibatkan penurunan kualitas pascapanen. Kitinoja (2008) menyarankan bahwa kedalaman peti harus dikurangi secara signifikan untuk mengurangi penumpukan gaya tekan yang dapat menyebabkan kerusakan mekanis pada buah-buahan di dasar peti. Keranjang bambu yang memiliki tepi yang tajam dapat merusak atau menyebabkan memar komoditas ketika digunakan. Idah, Ajisegiri, & Yisa (2007) juga merekomendasikan bahwa keranjang bambu harus ditenun dengan sisi bahan yang halus diputar ke dalam.

5) Penyimpanan

Penyimpanan adalah proses dimana produk disimpan dalam kondisi yang sesuai untuk penggunaan di masa depan untuk membatasi masuknya atau perbanyakan mikroorganisme, sehingga memungkinkan produk tersebut dapat dimanfaatkan selama beberapa waktu (biasanya berminggu-minggu hingga berbulan-bulan) setelah panen. Tujuan utama penyimpanan pangan adalah untuk mengawetkan hasil panen untuk dikonsumsi di luar musim, menjaga kondisi pangan tetap baik, memperlambat penuaan, menyediakan pasokan yang merata, menghindari kelebihan (*surplus*), mencegah kelangkaan, dan untuk memperoleh harga yang lebih tinggi.

Faktor yang harus dipertimbangkan dalam penyimpanan semua jenis produk adalah suhu dingin, kelembaban yang tepat, dan ventilasi yang baik. Suhu, ketika terlalu tinggi mendukung dekomposisi; ketika terlalu rendah menyebabkan pembekuan dan kerusakan atau perubahan pada jaringan. Kelembaban, ketika ruang penyimpanan terlalu kering maka menyebabkan sayuran dan buah-buahan mengering dan mengerut; namun

ketika terlalu banyak kelembaban maka dimungkinkan terjadi pertumbuhan organisme pembusuk. Ventilasi, bukan hanya alat untuk mengatur suhu dan kelembaban, tetapi juga penting dalam menghilangkan produk gas yang berbahaya.

6) Transportasi
Penggunaan transportasi yang tepat merupakan faktor utama yang harus diperhatikan dalam pascapanen penanganan komoditas hortikultura. Penanganan transportasi yang lebih baik adalah dengan menggunakan wadah dan trailer berpendingin di jalan yang cukup baik. Pengangkutan komoditas masuk ke truk berpendingin tidak hanya nyaman, tetapi juga efektif dalam menjaga kualitas buah. Namun, keduanya membutuhkan investasi dan biaya operasional kendaraan yang sangat tinggi.

Di negara maju, praktik standar dalam pengiriman komoditas yang mudah rusak adalah dengan menggunakan kendaraan berpendingin (Elik et al., 2019), pengemasan dan pengiriman produk dalam wadah yang dikontrol suhunya sehingga dapat mengurangi pembusukan hingga sekitar 5% (Vigneault, Thompson, Wu, Hui, & LeBlanc, 2009). Menurut Iswahyudi, Darmawati, & Sutrisno (2015), perbaikan pengemasan mampu menekan kerusakan produk hortikultura selama transportasi.

Salah satu faktor yang harus diperhitungkan dalam perancangan kemasan adalah pola pengaturan produk dalam kemasan. Tekanan (*compression*) yang diterima buah semakin bertambah jika isi kemasan terlalu penuh (*over packing*) dan penumpukan kemasan terlalu tinggi. Isi kemasan yang terlalu penuh maupun yang terlalu kurang (*under packing*) juga menjadi penyebab kerusakan fisik pada produk. Kemasan yang terlalu kurang menyebabkan buah saling berbenturan dan terlempar akibat getaran selama transportasi (Rozana et al., 2021).

Menurut Vigneault et al. (2009), sistem manajemen transportasi hasil pertanian meliputi:

1) Pemilihan peralatan transportasi
Peralatan untuk transportasi produk harus dalam kondisi fisik yang baik, yang dilengkapi dengan sistem suspensi perjalanan yang akan menyerap kejutan/hentakan dan mengurangi kerusakan produk akibat getaran.

2) Persiapan muatan
Produk harus memiliki umur pascapanen yang cukup untuk perjalanan dan pemasaran selanjutnya setelah mencapai tujuannya, jika tidak maka tidak boleh dimasukkan dalam muatan. Produk yang akan dimasukkan dalam muatan berpendingin, terlebih dahulu diberi perlakuan precooling. Precooling adalah proses dimana panas cepat dihapus dari produk segera setelah panen.
3) Persiapan peralatan transportasi
   a) Pembersihan: Kebersihan semua komponen sistem pendingin perlu dijaga untuk memastikan sirkulasi udara yang baik di sekitar muatan, dan juga mengurangi tingkat patogen tanaman, serta kontaminasi kimia dan bau. Lantai harus dicuci atau disapu secara menyeluruh sebelum memuat. Saluran lantai harus bebas dari kotoran untuk menyediakan jalur sirkulasi udara.
   b) Kondisi kendaraan: Kendaraan seharusnya tidak mengalami kerusakan serius. Pintu harus tertutup rapat saat ditutup, saluran udara harus utuh, dan permukaan dinding bagian dalam harus dalam kondisi baik. Kendaraan berpendingin harus memiliki sekat depan yang kokoh.
   c) Pra-pendinginan atau pra-pemanasan kendaraan pengangkut: Kendaraan pengangkut harus didinginkan terlebih dahulu atau dipanaskan terlebih dahulu sebelum dimuat. Ini mengurangi beban pendinginan atau pemanasan awal pada sistem pendingin atau pemanas kendaraan.
4) *Loading*/ Memuat
Selama pemuatan kendaraan pengangkut, praktik penanganan untuk mencegah penurunan kualitas yang berlebihan selama tahap pengangkutan antara lain menghindari benturan dengan palet selama penanganan, menerapkan penyangga antara palet dan kedua dinding samping, dan jangan memuat produk yang sensitif terhadap kerusakan getaran langsung di atas pegas baja.
5) Penanganan di tempat tujuan dan selama ritel
Ketika produk tiba di tempat tujuan, penutup dan pembungkus palet harus dilepas, serta suhu dan kualitas

produk harus diperiksa. Di ritel, produk harus didinginkan pada saat kedatangan. Untuk mencegah peningkatan suhu selama dipajang, produk tidak boleh ditumpuk di lemari pajangan.

b. Teknologi pascapanen yang tepat

1) Penyimpanan dingin

Rantai dingin untuk komoditas yang mudah rusak dapat didefinisikan sebagai penanganan produk dalam suhu rendah selama tahapan pascapanen. Rantai dingin produk setelah panen meliputi pendinginan awal, penyimpanan massal, distribusi, pendinginan ritel, dan pendinginan rumah tangga sebelum dikonsumsi. Meskipun rantai dingin tidak harus mencakup semua langkah yang disebutkan di atas, namun harus melibatkan setidaknya satu dari langkah-langkah tersebut (Makule, Edna, Dimoso, & Tassou, 2022). Pada penyimpanan dingin, umur simpan buah dan sayuran dapat diperpanjang dan kualitasnya dapat dipertahankan dalam waktu lama jika suhu, tingkat kelembaban relatif, aliran udara, ruang antara wadah penyimpanan, pencampuran produk yang kompatibel (misalnya, sesuai dengan permintaan suhu, produksi bau, dan sensitivitas etilen), serta pengelolaan aliran masuk dan keluar produk mengikuti prinsip *'First In, First Out'* yang dapat dikendalikan dan dikelola dengan baik.

Selain itu, dalam penyimpanan dingin diperlukan penyimpanan setiap komoditas secara terpisah dan komoditas yang bersifat klimakterik disimpan pada tingkat kematangan yang sama. Beberapa komoditas tersebut tidak selalu cocok disimpan bersama. Hal ini berkaitan dengan transfer bau, misalnya apel dan pir harus dipisahkan dari seledri, kubis, wortel, dan bawang. Menyimpan seledri dengan bawang atau wortel dan buah jeruk dengan sayuran beraroma kuat harus dihindari. Komoditas penghasil etilen, seperti pisang, apel, alpukat, persik, plum, dan tomat harus disimpan secara terpisah dari tanaman yang peka/sensitif etilen, seperti wortel, selada, mentimun, dan kentang (Makule et al., 2022).

Selama penyimpanan dingin, e*dible coating* seperti beberapa lipid, protein, polisakarida atau campuran biopolimer dapat diterapkan pada buah dan sayuran segar untuk menjaga kualitasnya (termasuk tekstur, warna, dan nilai gizi) dan memperpanjang umur simpannya (Singh, Dravin, & Packirisamy, 2022). E*dible film* membentuk lapisan semi-permeabel tipis ketika diaplikasikan di atas permukaan produk segar untuk memberikan suasana yang dimodifikasi selama penyimpanan. Akibatnya transfer gas, kehilangan air, perubahan warna, dan kehilangan aroma berkurang. Selain itu, beberapa *edible film* merupakan pembawa agen antimikroba dan antioksidan sehingga membantu mengontrol pertumbuhan mikroba dan aktivitas biokimia, seperti respirasi dan transpirasi. Oleh karena itu, perlu diterapkan kombinasi antara suhu penyimpanan yang optimal dan pelapis yang dapat dimakan sehingga dapat meningkatkan efektivitas teknik pendinginan untuk produk segar.

2) Modified Atmophere Packaging

Modified Atmosphere Packaging (MAP) merupakan teknik yang sering diterapkan dalam industri pangan. MAP menggunakan kombinasi tiga gas, yaitu karbon dioksida (CO_2), oksigen (O_2), dan nitrogen (N_2). Peningkatan konsentrasi CO_2 dapat menghilangkan pertumbuhan bakteri dan jamur sementara pengurangan konsentrasi O_2 dapat mengurangi oksidasi minyak/lemak yang ada dalam produk pangan. Komposisi gas bervariasi dari satu produk pangan ke produk lainnya. Umur produk pangan yang disimpan dalam kondisi atmosfer termodifikasi tergantung pada berbagai faktor seperti sifat pangan, komposisi gas yang digunakan, suhu penyimpanan, proses pengemasan, dan mesin pengemasan yang digunakan (Yunus Khan & Mittal, 2020). Modifikasi atmosfer yang lebih banyak CO_2 dan lebih sedikit O_2, berpotensi menurunkan laju respirasi, produksi dan sensitivitas etilen, serta pembusukan dan perubahan fisiologis. Perpanjangan umur simpan karena atmosfer yang dimodifikasi terutama disebabkan oleh konsentrasi O_2 yang rendah dan konsentrasi CO_2 yang tinggi di atmosfer

yang mengelilingi produk, menyebabkan penurunan laju respirasi dan juga menghambat pertumbuhan mikroba (Ruiz-Ares et al., 2007).

Selama MAP, produk segar umumnya dikemas dalam kantong film polimer; atmosfer di dalam kemasan yang dimodifikasi karena dua proses: respirasi produk dan difusi gas melalui film kemasan. Pengemasan atmosfer termodifikasi aktif atau pasif dapat digunakan. Modifikasi aktif terjadi dengan mengubah udara awal pada kemasan dengan campuran gas yang diinginkan, sedangkan modifikasi pasif terjadi ketika produk dikemas menggunakan udara sebagai komposisi atmosfer kemasan awal (Ruiz-Ares, Lareo, & Lema, 2007).

MAP merupakan modifikasi atmosfir yang dapat diciptakan secara pasif yaitu dengan menggunakan kemasan dengan permeabilitas tertentu atau secara aktif dengan menggunakan perpaduan gas tertentu dengan bahan kemasan yang permeabel. Tujuan keduanya adalah untuk menciptakan kesetimbangan gas yang optimal dalam kemasan, dimana aktivitas respirasi produk dapat berlangsung serendah mungkin tetapi tingkat konsentrasi oksigen dan karbondioksida tidak sampai merugikan bagi produk. Bahan yang paling umum digunakan dari jenis kemasan MAP adalah polietilen tereftalat (PET), *Low Density Poliethylene* (LDP), *High Density Poliethylene* (HDP), *Polivinil chlorida* (PVC), polipropilen, dan polistirena (Artes, G'omez, & Art´es-Hern´andez , 2006).

Desain MAP melibatkan pemilihan film yang cermat, jenis kemasan dan ukuran untuk setiap produk tertentu. Permeabilitas terhadap O_2 dan CO_2 dan laju transmisi uap air adalah faktor terpenting yang harus dipertimbangkan saat memilih film untuk MAP. Permeabilitas ini merupakan faktor kunci dalam menentukan komposisi atmosfer kemasan dan kelembaban di dalam kemasan, dan oleh karena itu dapat mempengaruhi tingkat kerusakan produk (Ruiz-Ares et al., 2007). Jenis kemasan MAP yang paling umum digunakan bahannya adalah polietilen tereftalat (PET), *Low Density Poliethylene* (LDP), *High Density Poliethylene* (HDP), *Polivinil chlorida* (PVC), polipropilen, polistirena (Artes, Gomez, Hernandez, 2006; Sandyha, 2010).

Permeabilitas terhadap O2 dan CO2 biasanya ditentukan pada 25°C, sedangkan laju transmisi uap air ditentukan pada 38°C (Ruiz-Ares et al., 2007).

Manfaat MAP tidak hanya dalam menyediakan kondisi atmosfer untuk mengontrol pematangan (Kader & Watkins, 2000), tetapi juga dalam mengurangi kehilangan air dalam produk yang disimpan, mengurangi kerusakan mekanis, dan meningkatkan kebersihan yang lebih baik yang mengurangi penyebaran penyakit *food borne disease* (Kader & Watkins, 2000). Kehilangan air dan terjadinya pengkerutan pada komoditas menjadi salah satu penyebab kemunduran mutu komoditas. Buah yang mengerut merupakan indikasi hilangnya kelembaban. Oleh karena itu, penggunaan MAP akan mencegah atau mengurangi masalah kehilangan air pada komoditas yang dipanen. Namun, kelembaban relatif yang terlalu tinggi di dalam kemasan justru akan mengakibatkan terjadinya kondensasi pada komoditas, yang pada gilirannya akan menciptakan lingkungan yang kondusif yang menguntungkan untuk aktivitas patogen sehingga meningkatkan risiko kerusakan buah (Suparlan & Itoh, 2003). Oleh karena itu, diperlukan penggunaan MAP yang tepat untuk menghindari kondensasi kelembaban yang akan mengakibatkan kerusakan buah.

KESIMPULAN

Diperkirakan lebih dari 20% buah dan sayur mengalami kehilangan pangan (*food loss*). Komoditas buah dan sayur merupakan komoditas kedua terbesar di dunia yang mengalami kehilangan pangan. Kehilangan ini terjadi mulai dari pemanenan, penyimpanan, transportasi, dan pengolahan. Penanganan dan teknologi pascapanen dapat dilakukan untuk mengurangi *food loss* ini. Penanganan yang tepat dapat dilakukan mulai dari tahapan pemanenan, pra pendinginan, sortasi, grading, pengemasan, penyimpanan, dan transportasi. Adapun teknologi pascapanen yang dapat diterapkan yaitu manajemen penyimpanan dingin dan *modified atmosphere packaging*.

DAFTAR PUSTAKA

Artes,. F, G ´ omez, P. A., Art ´ es-Hern ´ andez, F. (2006). Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. *Stewart Postharvest Review*, 2(5), 1–13.

Arah, K., Amaglo, H., Kumah, E.K., & Ofori, H. (2015). Preharvest and postharvest factors affecting the quality and shelf life of harvested tomatoes: a mini review. *International Journal of Agronomy*, 2015, 1-5. Retrieved from https://www.hindawi.com/journals/ija/2015/478041/

Arah, I.K., Ahorbo, G.K., Anku, E.K., Kumah, E.K., & Amaglo, H. (2016). Postharvest handing practices and treatment methods for tomato handlers in developing countries: A mini review. *Advanves in Agriculture.* Retrieved from https://www.hindawi.com/journals/aag/2016/6436945/

Babitha, K. C., Ninganur, B. T., Chetti, M. B., Jirali, D. I., & Harlapur, S. I. (2010). Effect harvest treatment and atorage conditions on physio-chemical parameters in extending shelf life in tomato. *Plant Archhives*, 10(1), 37–,.

Bappenas. (2021). Laporan kajian food loss and food waste di Indonesia dalam rangka mendukung penerapan ekonomi sirkular dan pembangunan rendah karbon. Retrieved from https://lcdi-indonesia.id/wp-content/uploads/2021/06/Report-Kajian-FLW-FINAL-4.pdf.

Beckles, D.M. (2012). Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (Solanum lycopersicum L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 63 (1), 129–140. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.05.016.

Elik, A., Yanik, D.K., Istanbullu, Y., Guzelsoy, N.A., Yavuz, A., & Gogus, F. (2019). Strategies to reduce post-harvest losses for fruits and vegetables. *Int J Sci Technol Res*, 5(3):29–39. doi:10.7176/jstr/5-3-04.

Etefa, F.O., Forsido, S.F., & Kebede, M. (2022). Postharvest loss, causes, and handling practice of fruits and vegetables in Ethiophia: Scoping review. *Journal of Horticultural Research*, 30 (1). doi:10.2478/johr-2022-0002.

FAO. (2017). Productivity and efficiency measurement in agriculture. Global strategy to improve agricultural and rural statistics. Retrieved from http://www.fao.org/3/ca6428en/ca6428en.pdf

FAO. (2019). The state of food dan agriculture. Moving forward on food loss and waste reduction. Retrieved from https://www.fao.org/state-of-food-agriculture/2019/en/.

FAO. (2021). The world is at a critical juncture. Retrieved from https://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition

Faqeerzada, M.A., Rahman, A., Joshi, R., Park, E., & Cho, B-K. (2018). Postharvest technologies for fruits and vegetables in South Asian countries: A review. *Agricultural Sci Korean J Agric Sci*, 45(3), 325–353. doi:10.7744/kjoas.20180050.

Faruqi, U.A. (2019). Survey paper: Future service in industry 5.0. *Jurnal Sistem Cerdas*, 2(1), 67-79.

Fonseca, S.C., Oliveira, F.A.R., & Brecht, J.K. (2002). Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: A review. *J Food Eng*., 52(2), 99–119. doi:10.1016/S0260-8774(01)00106-6.

Herianto, Lala, A.A.T., Nurpasil. (2021). Perilaku konsumsi sebelum dan selama pandemi Covid 19 di Indonesia: Studi perbandingan. *Journal of Islamic economics and Finance Studies*, (2) 1, 94-109.

Hurst, W.C. (2010). *Harvest, handling, and sanitation*. In Commercial Tomato Production Handbook B 1312. University of Georgia: CAES Publications.

Idah, P. A., Ajisegiri, E. S. A., Yisa, M.G. (2007). Fruits and vegetables handling and transportation in Nigeria. *AU Journal of Technology*, 10 (3), 175–183. Retrieved from http://unaab.edu.ng/wp-content/uploads/2010/11/Fruits%20and%20Vegetables%20Handling%20and%20Transportation%20in%20Nigeria.pdf.

Irianto, H.E, & Giyatmi. (2021). *Susut dan limbah pangan*. Inovasi teknologi pangan menuju Indonesia emas. Bogor: IPB Press.

Iswahyudi, Darmawati, E., & Sutrisno. (2015). Perancangan kemasan transportasi buah jambu air (Syzygium aqueum) cv Camplong. *J Keteknikan Pertan*., 3(1), 65–72.

Kariyasa, K. & Suryana, A. (2012). Memperkuat ketahanan pangan melalui pengurangan pemborosan pangan. Retrieved from http://repository.pertanian.go.id/handle/123456789/4363

Kader, A., & Watkins, C. B. (2000). Modified atmosphere packaging—toward 2000 and beyond. *HortTechnology*, 10(3), 483–486.

Kandasamy, P. (2022). Respiration rate of fruits and vegetables for modified atmosphere packaging: A mathematical approach. *Journal of postharvest Technology*, 10(1), 88-102.

Keogh, J.G., Dube, L., Rejeb, A., Hand, K.J., Khan, N., & Dean K. (2020). *The future food chain: digitazition as an enabler of society*. Retrieved from https://www.elsevier.com/books/building-the-future-of-food-safety-technology/detwiler/978-0-12-818956-6.

Kitinoja, L. (2008). Causes and sources of postharvest problems. *Postharvest Training CDRom|Sample Presentations from Ghana*. 1–19,.

Lakakul, R., Beaudry, R.M., & Hernandez, R.J. (1999). Modeling respiration of apple slices in modified atmosphere packages. *Journal of Food Science*, 64,105-110.

Lentzou, D., Xanthopoulos, G., Templalexis, C., & Kaltsa, A. (2021). The transpiration and respiration as mechanisms of water loss in cold storage of figs. *Food Res*, 5(6), 109–118. doi:10.26656/fr.2017.5(6).178.

Makule, Edna, Dimoso, N., & Tassou, S.A. (2022). Precooling and cold storage methods for fruits and vegetables in Sub-Saharan Africa—A review. *Horticulturae,* 8(9),776. doi: 10.3390/horticulturae8090776.

Mebratie, M.A., Haji, J., Woldetsadik, K., & Ayalew, A. (2015). Determinants of postharvest banana loss in the marketing chain of central Ethiopia. *Food Science and Quality Management*, 37, 52–63.

Muchtadi, R.T. (2020). Penanganan dan pengolahan hasil hortikultura. Tangerang Selatan: Universitas Terbuka.

Mukama, M., Ambaw, A., & Opara, U.L. (2020). Advances in design and performance evaluation of fresh fruit ventilated distribution packaging: A review. *Food Packag Shelf Life*, 24 October 2019,100472. doi:10.1016/j.fpsl.2020.100472.

Nurhayati, N., Diniyah, N., & Kurniasari, P.G. (2018). Formulasi food bar berbasis tepung ubi jalar ungu dan pisang agung (*Musa paradisiaca Formatypica*) masak. *Jurnal Agroteknologi*, 12 (01), 71-78.

Paramita, O. (2010). Pengaruh memar terhadap perubahan pola respirasi, produksi etilen dan jaringan buah mangga (Mangifera Indica L) var gedong gincu pada berbagai suhu penyimpanan. *Jurnal Kompetensi Teknik*, 2 (1). Retrieved from http://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/JKT/article/view/116/118

Pérez-López, A., Ramírez-Guzmán, M.E., Espinosa-Solares, T., Aguirre-Mandujano, E., & Villaseñor-Perea, C.A. (2020). Postharvest respiration of fruits and environmental factors interaction: An approach by dynamic regression models. *Sci Agropecu.*, 11(1), 23–29. doi:10.17268/sci.agropecu.2020.01.03

Prasad, P., & Kochhar, A. (2014). Active packaging in food industry: a review. *Journal of Environmental Science. Toxicology and Food Technology*, 8 (5), 1–7.

Singh, P., Dravin, & Packirisamy, G. (2022). Biopolymer based edible coating for enhancing the shelf life of horticulture products. *Food Chemistry: Molecular Sciences* 4, 100085. doi: 10.1016/j.fochms.2022.100085.

Raison, J. K, & Lyons, J.M. (1986). Chilling injury: a plea for uniform terminology. *Plant, Cell & Environment*, 9(9), 685– 686.

Ridolfi, C., Hoffman, V., & Baral, S. (2018). Postharvest losses in fruits and vegetables. International food policy research institute. Retrieved from https://ebrary.ifpri.org/digital/api/collection/p15738coll2/id/132325/download

Rozana, R., Perdana, D., & Sigiro, O.N. (2021). Simulasi transportasi tomat dan perubahan mutu tomat selama penyimpanan. *J Food Technol Agroindustry*, 3(1):13–20. doi:10.24929/jfta.v3i1.1209.

Ruiz-Ares, G., Lareo, C., & Lema, P. (2007). Modified atmosphere packaging for postharvest storage of mushrooms: a review. *Fresh Prod*, 1(1):32–40.

Saltveit, M.E. (2016). The Three resonse of plant tissue to wounding. *Acta Hortic*, 1141, 13-19. Retrieved from https://postharvest.ucdavis.edu/files/253989.pdf.

Shahi, N. C., Lohani, U. C., Chand, K., & Singh, A. (2012). Effect of pre-cooling treatments on shelf life of tomato in ambient condition. *International Journal of Food, Agriculture and Veterinary Sciences*, 2 (3), 50–56.

Suparlan, & Itoh, K. (2003). Combined effects of hot water treatment (HWT) and modified atmosphere packaging (MAP) on quality of tomatoes. *Packaging Technology and Science*, 16 (4), 171–178.

United Nation. (2019). World population prospects 2019: Highlights. New York (US): United Nations Department for Economic and Social Affairs, 11(1), 125.

United Nation. (2021). The 17 goals. United Nation: Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development.

Vigneault, C., Thompson, J., Wu, S., Hui, K.P.C.H., & LeBlanc, D.I. (2009). Transportation of fresh horticultural produce. *Postharvest Technol Hortic Crop*, 2, 1–24.

Workneh, T. S., & Woldetsadik, K. (2004). Forced ventilation evaporative cooling: a case study on banana, papaya, orange, mandarin, and lemon. *Tropical Agirculture*, 81 (1), 1–6.

Yunus Khan, M., & Mittal, A. (2020). Modified atmosphere packaging technique: An overview. In International Conference on Recent Advances in Engineering and Science (ICRAES-2020). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/344706230.

Zakaria, M., Rehema, E., Mariam, M., & Mtunguja, K. (2014). Assessment of orange losses and existence of post-harvest methods (PHM) along the coast belt of Tanzania. *J Biol Agric Healthc*, 4(3), 14–21. Retrieved from http://r.search.yahoo.com/_ylt=A0SO8yuYRtFWoHgAqA9XNyoA;_ylu=X3oDMTEyY3RvdXNtBGNvbG8DZ3ExBHBvcwM0BHZ0aWQDQjE3NTdfMQRzZWMDc3I-/RV=2/RE=1456584473/RO=10/RU=http://www.iiste.org/Journals/index.php/JBAH/article/download/10975/11276/RK=0/RS=TP1YjKkohjqyMSLsrol.

Zainalabidin, F.A., Sagrin, M.S., Wan Azmi, W.N., & Ghazali, A.S. (2019). Optimum postharvest handling-effect of temperature on quality and shelf life of tropical fruits and vegetables. *J Trop Resour Sustain Sci*, 7(1):23–30. doi:10.47253/jtrss.v7i1.505

POTENSI PANGAN FUNGSIONAL PADA MAKANAN TRADISIONAL INDONESIA BERBASIS FERMENTASI

THE POTENCY OF FUNCTIONAL FOOD IN INDONESIAN TRADITIONAL FERMENTED FOOD

Athiefah Fauziyyah*, Eko Yuliastuti Endah Sulistyawati, Dini Nur Hakiki, Mohamad Rajih Radiansyah, Rina Rismaya, Mutiara Ulfah

Program Studi Teknologi Pangan, Jurusan pertanian, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

*athiefah.fauziyyah@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Indonesia memiliki kekayaan budaya berupa makanan tradisional yang diolah melalui proses fermentasi dan berpotensi sebagai pangan fungsional. Pada artikel ini akan membahas beberapa contoh makanan tradisional berbasis fermentasi yang terdiri dari growol, tempe, dadih dan tempoyak. Growol banyak ditemukan di Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah. Growol diketahui memiliki kandungan bakteri asam laktat yang dapat mencegah terjadinya diare dan memiliki indeks glikemik rendah. Tempe merupakan makanan tradisional yang banyak dikonsumsi oleh masyarakat Indonesia. Tempe memiliki potensi pangan fungsional karena mengandung senyawa antioksidan, dapat menurunkan kolesterol, menghambat adanya penyakit kardiovaskular dan dapat meningkatkan kandungan gizi mikro pada tubuh. Dadih merupakan makanan khas Sumatera yang memiliki efek hipokolesterolemik (menurunkan kadar kolesterol) dan mencegah kanker usus. Tempoyak yang dibuat dari buah durian memiliki manfaat menurunkan kadar kolesterol pada darah. Dengan banyaknya manfaat pada makanan tradisional berbasis fermentasi ini, perlu dilakukan usaha untuk menjaga eksistensinya di tengah gempuran produk pangan kekinian. Produksi makanan tradisional yang menggunakan teknologi setempat dan ramah lingkungan merupakan salah satu alternatif pengolahan teknologi yang mendukung Food Sustainability. Terdapat peluang dan tantangan dalam mempertahankan eksistensi makanan tradisional di Indonesia,

di antaranya adalah isu keamanan pangan, penggunaan teknologi proses yang efektif dan efisien serta pemanfaatan teknologi pengemasan yang berguna untuk mengontrol kualitas produk dan memperpanjang umur simpan.

Kata kunci : *fermentasi, food sustainability, makanan tradisional, pangan fungsional.*

ABSTRACT

Indonesia has a rich culture in the form of traditional foods that are processed through a fermentation process as a functionalfoods. In this article, we will discuss some examples of traditional fermented foods consisting of growol, tempeh, dadih and tempoyak. Growol is mostly found in DIY and Central Java. Growol is known to contain lactic acid bacteria that can prevent diarrhea and has a low glycemic index. Tempe is a traditional food that is widely consumed by the people of Indonesia. Tempe has the potential for functional food in the presence of antioxidant compounds, lowers cholesterol, inhibits cardiovascular disease and can increase micronutrient content in the body. Dadih is a typical Sumatran food that has a hypocholesterolemic effect (lowers cholesterol levels) and prevents colon cancer. Tempoyak made from durian fruit has the benefit of lowering cholesterol levels in the blood. Production of traditional food using local and environmentally friendly technology which is one of the alternative processing technologies that supporting Food Sustainability. There are opportunities and challenges in maintaining the existence of traditional foods in Indonesia, there are issues of food safety, the use of efficient and process technology and the use of technology that is useful for controlling product quality and extending shelf life.

Keywords: *fermentation, food sustainability, traditional food, functional food.*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang terdiri dari berbagai multi-etnis yang tersebar dari Sabang sampai Merauke. Data BPS (2010) menunjukkan telah ada lebih dari 1300 etnis yang hidup dan berkembang di Indonesia. Setiap etnis memiliki warisan budaya yang masih digunakan hingga saat ini. Sejak berabad-abad lalu, berbagai etnis di Indonesia memiliki dapur yang telah menciptakan dan mengembangkan berbagai cara pengolahan pangan berdasarkan kearifan lokal setempat. Berbagai produk hasil budaya ini diwujudkan dalam sebuah jenis makanan tradisional yang memiliki karakter khas masing-masing daerah.

Makanan tradisional didefinisikan sebagai makanan yang terbuat dari bahan baku yang dapat dengan mudah didapatkan di wilayah tersebut kemudian diolah dengan cara yang sudah dikuasai oleh masyarakat setempat. Makanan tradisional ini memiliki cita rasa, kenampakan dan aroma yang melekat dalam diri masyarakat (Harmayani, Santoso, & Gardjito, 2016). Makanan tradisional ini merupakan salah satu jenis aset budaya bernilai tinggi yang perlu dijaga kelestariannya. Usaha untuk menjaga kelestarian makanan tradisional ini perlu dilakukan. Upaya untuk terus menjaga eksistensi makanan tradisional merupakan salah satu sarana untuk mendukung *Food Sustainability* dimana makanan tradisional lebih banyak menggunakan teknologi setempat yang ramah alam dan lingkungan.

Salah satu jenis makanan tradisional yang banyak ditemukan di Indonesia adalah makanan tradisional berbasis proses fermentasi. Proses pengolahan pangan pada makanan tradisional ini merupakan hasil ide pemikiran yang jenius dari para leluhur. Di era Society 5.0, manusia tidak hanya membutuhkan makanan yang melezatkan namun juga memberi kesehatan. Berabad-abad lalu, para leluhur telah menciptakan pangan yang tidak hanya bisa diterima secara sensori, tetapi juga berkontribusi positif untuk tubuh. Beberapa penelitian telah melaporkan bahwa ada banyak kandungan gizi yang bermanfaat pada makanan tradisional berbasis fermentasi. Beberapa contoh makanan tradisional fermentasi yang telah diteliti antara lain growol, tempe, tempoyak dan dadih. Adanya senyawa isoflavon pada tempe berkontribusi terhadap aktivitas

antioksidan pada tempe. Growol yang berbahan baku singkong, memiliki kandungan serat yang tinggi sehingga baik untuk kesehatan. Bakteri asam laktat yang terdapat pada dadih dan tempoyak dapat berpotensi untuk menurunkan kolesterol dalam darah.

Pada artikel ini akan membahas tentang jenis makanan tradisional berbasis fermentasi yang terdiri dari growol, tempe, tempoyak dan dadih yang ditinjau dari aspek sejarah, cara pengolahan serta potensinya sebagai pangan fungsional. Selain itu juga dipaparkan mengenai bagaimana tantangan dan peluang makanan tradisional Indonesia dapat tetap berdiri tegak dan meningkat kualitasnya di tengah gempuran berbagai produk pangan kekinian baik dari dalam negeri maupun luar negeri.

PEMBAHASAN

1. Makanan Tradisional Berbasis Fermentasi

Makanan tradisional didefinisikan sebagai pangan yang cara pengolahan dan bahan bakunya berasal dari sumber daerah setempat. Bahan baku yang digunakan merupakan bahan yang mudah ditemukan di wilayah tersebut. Cara pengolahan yang digunakan sudah dikuasai oleh warga lokal. Atribut sensori yang dihasilkan berupa cita rasa, aroma dan kenampakan merupakan atribut yang sangat dikenal dan dirindukan oleh masyarakat setempat (Harmayani, Santoso, & Gardjito, 2016). Ada berbagai makanan tradisional yang telah ada di Indonesia. Pada artikel ini khusus membahas mengenai makanan tradisional berbasis fermentasi.

Pangan fermentasi merupakan produk pangan yang melibatkan mikroba dalam pengolahannya. Fermentasi sendiri telah ditemukan berpuluh-puluh tahun lalu, bahkan sebelum masehi. Beberapa contoh produk fermentasi tertua yang telah ditemukan sebelum masehi adalah bir (6000 SM) dan roti (4000 SM). Selanjutnya, Theodore Schwan pada tahun 1837 memublikasikan mengenai fermentasi alkohol. Dua puluh satu tahun setelah penemuan tersebut, Louis Pasteur melaporkan mengenai fermentasi asam laktat. Dilanjutkan pada tahun 1861, konsep mengenai fermentasi semakin diperjelas oleh

Louis Pasteur yang menerangkan kontribusi sel khamir secara anaerobik. Proses fermentasi biasanya memerlukan waktu beberapa jam bahkan hari. Tujuan fermentasi antara lain menambah masa umur simpan, memperbaiki atribut sensori dan peningkatan gizi. Adanya peningkatan gizi akibat proses fermentasi disebabkan oleh perubahan senyawa kimia kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana sehingga mudah diserap dan dicerna tubuh (Koeswardhani et al., 2008).

Di Indonesia, telah banyak makanan tradisional yang merupakan hasil olahan dari proses fermentasi. Tak jarang, pangan fermentasi ini menjadi buah tangan bagi para pelancong yang sedang mengunjungi wilayah tertentu di Indonesia. Adapun contoh berbagai jenis makanan tradisional berbasis fermentasi di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 1. Pada artikel ini akan membahas empat jenis makanan tradisional berbasis fermentasi yang terdiri dari growol, tempe, tempoyak dan dadih.

Tabel 1. Jenis Makanan Tradisional Indonesia Berbasis Fermentasi

Nama Makanan	Bahan Baku	Jenis Mikroba	Potensi	Referensi
Growol	singkong	*Lactobacillus plantarum dan Lactobacillus casei subsp. Rhamnosus Lactobacillus plantarum T-3*	mencegah diare, menurunkan gula darah	Eni, Lestari, & Juffrie, 2010; Putri, Haryadi, Marseno, & Cahyanto, 2012 Nofia, Wasita, & Susilawati, 2022
Tempe	kedelai	*Rhizopus sp*	antioksidan, menurunkan kolesterol	Astawan, Wresdiyati, Widowati, Bintari, & Ichsani, 2013 ; Romadona & Fitriyani, 2013
Gathot	singkong	*Lasiodiplodia theobromae*	antioksidan penurunan glukosa darah	Purwandari, Tristiana, & Hidayati, 2014

Nama Makanan	Bahan Baku	Jenis Mikroba	Potensi	Referensi
Tempoyak	durian	*Leuconostoc mesentroides, Lactobacillus curvatus, Pediococcus acidilactici dan Lactobacillus plantarum*	menurunkan kolesterol	Hasanuddin, 2010., Pato & Surono, 2013
Dadih	susu	*Lactobacilus plantarum, Lactococcus lactis*	mencegah kanker usus, menurunkan kolesterol	Pato, Surono, Koesnandar, & Hasono, 2004; Pato, 2004 Usmiati & Risfaheri, 2013
Oncom	ampas kedelai, ampas tahu, sisa bungkil kacang tanah, ampas kelapa	*Neurospora sp*	antioksidan antikanker antiinflamasi	Mustarichie et al., 2012

a. Growol

Growol banyak ditemukan di daerah Kulonprogo, Wates, Purworejo dan sekitarnya. Growol berasal dari olahan ketela pohon/singkong. Di wilayah Jawa Tengah, singkong banyak ditemukan di lahan pertanian warga. Tanaman ini relatif mudah untuk tumbuh di daerah pertanian sekitar Kulonprogo dan sekitarnya. Pada zaman dahulu, warga menjadikan singkong sebagai salah satu sumber kalori harian dalam diet pangan. Salah satu olahan singkong adalah growol. Jenis pangan ini memiliki flavor yang unik dengan rasa hambar sedikit asam. Tekstur growol agak renyah seperti adonan remahan. Makanan tradisional ini memberi kenampakan warna putih setelah dikukus. Masyarakat menengah ke bawah biasa mengonsumsi growol satu kali sehari dengan lauk berupa besengek tempe benguk. Growol juga sering disajikan dengan cara ditaburi parutan kelapa dan garam (Harmayani, Santoso, & Gardjito, 2016).

Growol diolah secara tradisional di pedesaan melalui proses fermentasi spontan. Proses pengolahan growol diawali dengan tahap persiapan. Pada tahap persiapan, singkong hasil panen dikupas untuk menghilangkan kulitnya kemudian dicuci. Singkong yang digunakan memiliki umur maksimal 48 jam dihitung dari waktu panen. Hal ini dilakukan untuk menjaga mutu rasa growol. Setelah dibersihkan, kemudian singkong direndam dalam air selama 4-6 hari pada suhu ruang. Selama perendaman, air harus diganti tiap hari untuk mencegah flavor dan aroma yang kurang sedap pada produk. Proses ini merupakan tahapan fermentasi yang terjadi secara alami. Pada tahapan ini, mikroba yang berperan di antaranya adalah *Coryneform, Streptococcus, Bacillus, Actinobacter*. Mikroba ini memiliki enzim amilase yang dapat memecah pati menjadi gula sederhana. Pada tahapan ini, tekstur singkong yang keras berubah menjadi lembek dan lembut. Proses ini juga terbukti menurunkan kandungan sianida sebesar 90-100%. Gula sederhana yang terbentuk dari hasil pemecahan pati akan digunakan oleh bakteri pembentuk asam laktat jenis *Lactobacilus* dan yeast untuk membentuk cita rasa growol. Setelah itu dilakukan tahap pencucian, pemisahan serat ubi kayu, pengepresan dan penggilingan. Pada tahap akhir dilakukan proses pengukusan selama 1 jam. Setelah itu, growol dicetak setengah lingkaran dengan bantuan cetakan baskom dan dialasi daun pisang (Kuswanto dalam Harmayani Santoso, & Gardjito, 2016; Afrianto & Wariyah, 2020).

Growol diketahui memiliki kandungan mikroba probiotik yang baik untuk kesehatan. Menurut Putri, Haryadi, Marseno, & Cahyanto (2012), beberapa mikroba asam laktat yang dominan pada growol antara lain *L. plantarum* dan *L. casei subsp. Rhamnosus*. Pada penelitian lain, Nuraida (2015) menjelaskan bahwa growol mengandung mikroba *Lactobacillus plantarum T-3* yang dapat mencegah berkembangnya mikroba *Shigella dysentriae*. Selain itu, adanya *Lactobacillus TGR-2* pada growol dapat mencegah berkembangnya mikroba *Staphylococcus typhimurium,Staphylococcus aureus, Escherichia coli, Moraganella morganii dan Bacillus cereus*. Adanya kandungan probiotik pada growol ini dapat menekan adanya mikroba penyebab diare pada anak. Menurut laporan penelitian yang mengikutsertakan anak berumur 1-5 tahun berjumlah 472 di Kulonprogo, ditemukan adanya korelasi antara kuantitas

konsumsi growol dengan angka kejadian diare pada anak. Semakin sering frekuensi anak dalam mengkonsumsi growol, semakin kecil kemungkinan kejadian anak akan terkena diare. Terdapat kemungkinan sebesar 47,4% angka kejadian pada responden yang tidak mengkonsumsi growol dibandingkan responden yang mengkonsumsi growol. Konsumsi growol dianjurkan dilakukan minimal 6,4 kali/minggu atau hampir tiap hari (Eni et al., 2010).

Puspaningtyas, Sari, Kusuma, & Helsius (2019) melaporkan proses fermentasi yang berlangsung selama produksi growol akan menurunkan nilai gula reduksi, kadar gula total dan sukrosa. Hal ini akan memungkinkan terjadinya penurunan indeks glikemik pada growol. Penurunan indeks glikemik dapat mengontrol kadar lipid dan glukosa dalam darah (Nofia, Wasita, & Susilawati, 2022). Pada penelitian yang sama juga melaporkan bahwa proses produksi singkong menjadi growol akan meningkatkan nilai serat pangan total, serat pangan larut air dan serat pangan tidak larut air. Kandungan serat pangan total pada growol sebesar 13,17%. Menurut BPOM (2016), pangan dikatakan memiliki kandungan serat yang tinggi jika memiliki kandungan di atas 6%. Berdasarkan data dari penelitian ini, growol dapat dikatakan memiliki kandungan serat yang tinggi. Serat pangan memiliki banyak manfaat untuk kesehatan. Konsumsi serat pangan dapat memberikan efek viskositas yang tinggi pada digesta. Hal ini mempengaruhi jumlah absorpsi kolesterol dan glukosa yang pada akhirnya dapat mencegah penyakit hiperkolesterol maupun diabetes. Selain itu, serat pangan yang terdapat dalam kolon akan mengalami proses fermentasi dan menghasilkan SCFA (*short chain fatty acid*) yang diketahui dapat mencegah kenaikan kolesterol (*propionate*) dan mencegah kanker kolon (butirat)(Marsono, 2008).

b. Tempe

Tempe merupakan pangan tradisional yang sudah jamak ditemukan di piring rumah tangga masyarakat Indonesia. Masyarakat Indonesia telah mengenal tempe sejak lama. Konsumsi tempe pernah dibukukan dalam sebuah manuskrip Serat Centhini yang ditulis oleh Rangga Sutrasna saat masa pemerintahan Sultan Pakubawana V, Surakarta (Shurtelff dan Aoyagi dalam Harmayani, Santoso, & Gardjito, 2016). Pada

dokumen tersebut menjelaskan bahwa pada abab-16 tempe telah dikenal oleh masyarakat Jawa. Selama pemerintahan Raja Sultan Agung (1613-1645) tempe telah menghiasi berbagai meja makan warga saat itu. Di masyarakat Jawa, tempe merupakan salah satu makanan wajib yang dihidangkan pada lauk pauk selamatan yang diadakan pada berbagai kegiatan. Saat ini, terdapat berbagai produk turunan tempe khas yang dijadikan oleh-oleh khas daerah seperti keripik tempe khas Malang, Bandung, Purwokerto, hidangan tempe mendoan di Kebumen, Banyumas dan Purwokerto serta tempe kemul di Yogyakarta.

Bahan baku tempe berasal dari kedelai. Untuk menjadi produk tempe, kedelai melewati proses fermentasi yang dibantu dengan kapang *Rhizopus sp* atau yang biasa dikenal dengan ragi tempe. Proses pengolahan tempe diawali dengan pencucian kedelai sehingga menjadi bersih. Setelah itu, kedelai ditempatkan dalam panci/baskom kemudian dituang air yang telah mendidih. Kedelai direndam selama 12 jam. Setelah perendaman, kedelai dicuci kembali dan dilakukan pengadukan hingga semua kulit kedelai terkelupas dan terbelah bijinya. Kulit yang terkelupas dipisahkan dari kedelai dan dibuang. Kemudian kedelai tanpa kulit dikukus selama 30 menit hingga tekstur menjadi lebih empuk. Selanjutnya kedelai ditebar dalam wadah/tampah yang sudah dikeringkan dan dibersihkan. Setelah itu ditampahkan 1 sendok makan tepung tapioca dengan perbandingan 1: 1 kg kedelai kemudian aduk rata. Setelah itu dilakukan pendinginan dengan kipas sampai suhu sekitar 30^0C. Saat suhu sudah tercapai, ragi tempe ditaburkan sesuai kebutuhan. Setelah itu dikemas dengan daun pisang. Jika pengemasan menggunakan plastik, dilakukan penusukan pada beberapa bagian plastik dengan jarum hingga merata. Kedelai yang terkemas kemudian diinkubasi selama 24 jam pada suhu ruang (Alvina & Hamdani, 2019).

Tempe diketahui memiliki banyak manfaat untuk kesehatan. Astawan Astawan, Wresdiyati, Widowati, Bintari, & Ichsani (2013) melaporkan bahwa tempe yang berasal dari kedelai impor dan lokal memiliki kandungan antioksidan sebesar 186-191 mg AEAC/kg tempe dan kandungan serat sebesar 6,21-6,77 %. Senyawa antioksidan dapat menghentikan pembentukan radikal bebas yang akan mengganggu kesehatan tubuh. Adanya kandungan antioksidan dalam tempe karena adanya senyawa isoflavon yang terdiri dari genistein, glisitein dan daidzein.

Romadona dan Fitriyani (2013) melaporkan bahwa tempe dapat menghambat adanya penyakit kardiovaskular dengan menurunkan total dan LDL kolesterol.

Selain itu, tempe juga memiliki kandungan gizi mikro yang tinggi. Astuti, Aminah, & Syamsinah (2014) melaporkan bahwa tempe memiliki kandungan zat besi sebanyak 2 mg/100 gram. Lebih lanjut Siallagan et al. (2016) menyatakan bahwa pemberkan tempe 25 gram dengan jumlah pemberian 3x sehari dalam kurun waktu 6 bulan dapat meningkatkan kadar ferritin dan serum besi. Hal ini diperkuat dengan penelitian Sudargo et al. (2013) yang melaporkan bahwa pemberian tempe pada tikus betina selama 17 hari dapat meningkatkan kadar hemoglobin secara nyata. Selain itu, tempe juga kaya akan asam folat. Hasil penelitian Susilowati, Ghozali, dan Maryati (2018) menyebutkan bahwa kandungan asam folat tempe sebesar 268,33 mikro gram/ml. Sine dan Soetarto (2018) menjelaskan bahwa proses pengolahan kedelai menjadi tempe melalui proses fermentasi dapat meningkatkan kandungan vitamin B12 sebanyak 16,5%. Vitamin B12 berfungsi untuk membantu pembentukan sel darah merah.

c. Tempoyak

Tempoyak merupakan pangan tradisional yang banyak ditemukan di daerah Sumatera khususnya Jambi, Riau, Lampung, Palembang dan Bengkulu. Tempoyak dibuat dari olahan fermentasi buah durian yang merupakan pangan yang sangat digemari oleh masyarakat melayu. Buah durian sendiri sangat mudah ditemukan di daerah Sumatera. Salah satu produk turunan durian yang populer adalah tempoyak. Tempoyak biasa digunakan sebagai pendamping nasi atau dimanfaatkan sebagai bumbu pelengkap makanan olahan lain seperti brengkes atau tempoyak ikan patin (Haruminori, Angelia, & Purwaningtyas, 2018). Secara visual, tempoyak memiliki bentuk semi padat dan memiliki warna putih kekuningan. Atribut tekstur yang dimiliki tempoyak antara lain berserat halus, tekstur lunak, lembut agar kental seperti bumbu durian dan sedikit berair. Tekstur lunak dan berair ini dihasilkan dari proses fermentasi durian yang menyebabkan adanya degradasi daging durian yang memiliki kandungan air tinggi sekitar 55-67%. Atribut warna dipengaruhi oleh jenis bahan baku durian yang digunakan.

Selain itu, umur simpan tempoyak juga akan mempengaruhi kenampakan warna. Tempoyak yang masih baru diproduksi memiliki kenampakan warna putih kuning. Seiring berjalannya waktu, tempoyak akan berwarna kecoklatan yang diakibatkan oleh reaksi oksidasi. Tempoyak memiliki aroma durian, asam dan sedikit rasa alkohol. Atribut rasa tempoyak terdiri dari rasa durian, asam, asin, manis, gurih dan lezat (Yuliana, 2007).

Produksi tempoyak dapat dilakukan dengan dua cara yaitu dengan penambahan kultur ragi dan fermentasi spontan. Pembuatan tempoyak dengan penambahan ragi secara sengaja dimaksudkan untuk meminimalkan kultur bakteri yang tidak diinginkan seperti khamir, jamur dan *Bacillus sp*. Mikroba yang biasa digunakan sebagai starter bakteri adalah jenis bakteri asam laktat seperti *Pediococcus acidiliactiti*. Menurut Yuliana (2007) penggunaan starter bakteri dapat memperpendek masa fermentasi menjadi 2-4 hari dan dapat mencegah kontaminan bakteri lain tumbuh dalam tempoyak. Secara tradisional, tempoyak banyak diolah dengan cara fermentasi spontan. Mikroba yang tumbuh merupakan bakteri indigenous yang berasal dari durian dan lingkungan produksi. Secara tradisional, proses pembuatan tempoyak diawali dengan cara menghaluskan daging durian. Setelah itu dilakukan penambahan garam. Konsentrasi garam yang diberikan berkisar antara 2,5%-30% bb. Setelah itu dilakukan proses fermentasi dengan cara menyimpan durian dalam wadah tertutup selama 3-10 hari.

Penggunaan konsentrasi garam pada pengolahan tempoyak akan mempengaruhi karakteristik akhir produk. Jika garam yang ditambahkan konsentrasinya kurang dari 5% akan menghasilkan produk akhir yang asam. Kandungan garam yang relatif rendah akan menginduksi pertumbuhan bakteri asam laktat yang berkontribusi terhadap timbulnya rasa asam pada produk. Sebaliknya, jika penggunaan garam dengan konsentrasi lebih dari 5%, produk akhir akan memiliki rasa asin. Di sisi lain, penggunaan garam relatif tinggi juga akan memperpanjang masa simpan tempoyak karena garam memiliki sifat sebagai pengawet. Penambahan garam yang relatif tinggi juga akan menyeleksi pertumbuhan asam laktat. Penambahan garam mengakibatkan penarikan air dan bahan seperti gula, mineral, protein terlarut dan bahan dasar lain, yang selanjutnya akan digunakan sebagai substrat pertumbuhan mikroba yang berkontribusi dalam proses fermentasi (Yuliana, 2007).

Aisyah, Kusdiyantini, dan Suprihadi (2014) melaporkan bahwa kandungan gizi tempoyak menunjukkan bahwa nilai kadar karbohidrat 48,79%, kadar lemak 2,69%. Kadar abu 27.03%, kadar air 15,12% dan kadar protein sebesar 6,37%. Selain itu, pada tempoyak terdapat empat species bakteri asam laktat yaitu *Leuconostoc mesentroides, Lactobacillus curvatus, Pediococcus acidilactici* dan *Lactobacillus plantarum* (Hasanuddin, 2010). Bakteri asam laktat pada tempoyak memiliki sifat tidak berspora, mikroaerofilik, berbentuk kokus dan batang, gram positif, katalase negatif serta memiki dapat menghasilkan asam laktat, gas karbondioksida, dan asam organic lain seperti asam asetat dan asam malat yang membuat tempoyak memiliki atribut rasa. Bakteri asam laktat sendiri memiliki banyak manfaat untuk kesehatan seperti mengatasi diare, mencegah kanker, meningkatkan imunitas dan menurunkan kolesterol (Yuliana, 2007). Pato Surono (2013) melaporkan bahwa proses fermentasi pada durian akan menghasilkan bakteri *Enterococcus sp* yang mempunyai sifat toleran terhadap empedu dan asam serta mempunyai potensi dalam menurunkan serum kolesterol.

d. Dadih

Dadih merupakan makanan khas Sumatera Barat yang terbuat dari fermentasi susu kerbau. Produk dadih ditemukan secara tidak sengaja. Saat itu masyarakat Minangkabau menemukan bahwa sisa susu kerbau tidak terkonsumsi yang disimpan dalam tempurung kelapa mengalami perubahan fisik. Setelah disimpan selama dua hari, susu menggumpal dan muncul cairan hijau yang memisah. Susu menggumpal berwarna putih dan menyerupai tahu inilah yang dikenal sebagai dadih. Dadih bisa dikonsumsi secara langsung maupun sebagai campuran dalam sistem pangan. Dadih bisa disajikan bersama nasi yang dilengkapi dengan irisan bawang merah dan cabai merah. Selain itu, dadih juga bisa dikonsumsi dalam wujud minuman dingin yang dilengkapi santan, emping kentan dan gula merah (Usmiati & Risfaheri, 2013). Masyarakat Minangkabau menyajikan dadih sebagai hidangan untuk tamu. Selain di Sumatera Barat, dadih juga merupakan makanan khas dari Suku Sipai, Bengkulu. Dadih biasa digunakan sebagai pelengkap sesaji saat upacara tabot. Satu cangkir dadih disiapkan untuk memenuhi keinginan leluhur yang telah dipercayai selama turun temurun. Sajian ini

merupakan suatu simbol penghormatan terhadap arwah nenek moyang (Harmayani et al., 2016).

Secara umum, proses pembuatan dadih tradisional terdiri dari pemerahan, persiapan bambu dan fermentasi spontan. Proses awal dimulai dengan mengumpulkan susu kerbau yang telah diperah dalam suatu wadah yang higienis. Setelah itu dilakukan penyaringan secara manual lalu kemudian dimasukkan ke dalam bambu. Kemudian bambu ditutup dengan daun pisang dan diperam 2 hari pada suhu ruang. Bambu yang digunakan merupakan bambu khusus, dimana bambu memiliki rasa pahit sehingga tidak disukai semut. Bambu yang biasa digunakan antara lain bambu ampel (*Bambusa vulgaris*), bambu gombong (*Gigantochloa verticillata*), bambu betung (*Dendrocalamus asper*) bambu talang (*Schizostachyum brachycladum*) atau bambu buluh (*Bambusoideae*). Menariknya, penggunaan bambu yang berbeda ternyata mempengaruhi kenampakan produk dadih. Jika menggunakan bambu buluh, dadih memiliki tekstur yang kasar dan berwarna kuning gading. Sedangkan jika menggunakan bambu betung, dadih memiliki kenampakan warna putih dan tekstur licin (Usmiati & Risfaheri, 2013; Harmayani, Santoso, & Gardjito, 2016).

Dadih yang melewati proses fermentasi berpotensi mengandung mikroba asam laktat di antaranya adalah *Lactobacilus, Streptococcus, Lactococcus*. Mikroba probiotik dalam dadih dapat menghasilkan vitamin B sehingga mutu dadih meningkat (Usmiati & Risfaheri, 2013). Selain itu, dadih juga berpotensi dapat memberikan efek hipokolesterolemik (menurunkan kadar kolesterol) yang diujikan pada tikus percobaan. Hal ini dapat terjadi melalui proses dekonjugasi berbagai garam empedu oleh aktivitas enzim (Pato, 2004). Selain itu bakteri asam laktat yang terdapat pada dadih juga dapat mencegah kanker usus. Hal ini dimungkinkan karena bakteri asam laktat dapat menghambat dan menurunkan senyawa mutagenesis yang ada pada pangan. Efek antimutagenik ini berlangsung dengan cara adanya ikatan antara karsinogen atau mutagen yang terikat pada peptidoglikan pada dinding sel bakteri asam laktat. Senyawa karsinogen dan mutagen yang mengikat pada bakteri ini akan keluar bersama air kemih dan feses (Pato, 2003). Selain itu, dadih diketahui memiliki potensi sebagai antioksidan. Chalid dan Hartiningsih (2013) melaporkan

bahwa dadih tanpa lemak memiliki aktivitas antioksidan dengan nilai IC50 sebesar 44,86 ppm. Nilai ini lebih baik dibandingkan aktivitas antioksidan dari quercetin yang hanya memiliki nilai IC50 sebesar 81,83 ppm.

2. Peluang dan Tantangan Pangan Tradisional Berbasis Fermentasi

a. Keamanan Pangan

Pangan tradisional Indonesia lebih banyak menggunakan fermentasi tradisional/spontan sesuai dengan kearifan lokal pada masing-masing daerah. Cara pengolahan tersebut sudah turun-temurun diwariskan dari para leluhur sebagai salah satu khasanah kekayaan budaya Indonesia. Akan tetapi, fermentasi spontan memiliki kelemahan, salah satunya yaitu kemungkinan akan munculnya mikroba yang tidak diinginkan. Hasanuddin (2010) melaporkan bahwa pada mikroflora pada sampel tempoyak terdiri dari mikroba yang menyehatkan seperti *Leuconostoc mesentroides, Lactobacillus curvatus , Pediococcus acidilactici dan Lactobacillus plantarum*, namun ditemukan juga spesies yang tidak menguntungkan seperti *Penicillium cp.* Adanya penicillium perlu diwaspadai karena mikroba ini dapat menghasilkan *mycotoxin*.

Untuk menanggulangi hal tersebut, praktik baik yang berprinsip *pada Good Manufacturing Practices* (GMP) perlu dilakukan. Ada beberapa aspek yang perlu diperhatikan untuk menjaga keamanan produk makanan tradisional berbasis fermentasi. Aspek tersebut antara lain kebersihan pekerja/ produsen, kebersihan alat produksi, kebersihan lingkungan dan kebersihan produk. Aspek kebersihan produsen yang harus diperhatikan antara lain orang yang ditugaskan sebagai pembuat produk dipastikan bekerja dalam kondisi higienis, mencuci tangan sebelum dan sesudah proses produksi dan tidak dalam keadaan sakit. Aspek kebersihan alat produksi mencakup penggunaan alat produksi yang bebas dari kontaminan dan mudah untuk dibersihkan, air yang digunakan sebagai bahan pembantu produksi merupakan air bersih dan layak konsumsi. Selain itu fasilitas sanitasi dan kebersihan juga telah tersedia. Pastikan proses sanitasi tidak bersamaan waktunya dengan proses produksi. Aspek kebersihan lingkungan diantaranya adalah lingkungan yang digunakan sebagai

tempat produksi harus bebas dari hama dan kotoran hama, tidak dekat dengan tempat pembuangan sampah baik padat maupun cair, lingkungan juga harus dijaga agar selalu bersih dan tidak berdebu. Adapun aspek kebersihan produk terdiri dari dua kategori yang harus dilakukan yakni pengawasan dalam pengendalian proses dan penyimpanan produk. Yang termasuk dalam kategori pengendalian proses antara lain penggunaan bahan baku yang aman, bermutu, terjamin dan terpercaya, penanganan bahan baku yang konsisten serta sesuai dengan sifat komoditinya, serta selalu mendokumentasikan tanggal kadaluarsa bahan. Pada proses penyimpanan, pastikan produk akhir disimpan di tempat serta aman, bersih, rapi serta kondisi suhu penyimpanan sesuai dengan karakteristik bahan.

Selain itu, Untuk menanggulangi adanya kontaminan, diperlukan perbaikan teknik produksi untuk memperoleh produk pangan fermentasi yang berkualitas. Yuliana (2007) menyatakan, pengolahan fermentasi dengan penambahan starter yang berkualitas, mencegah pertumbuhan mikrobia kontaminan. Pada pengolahan tempoyak yang ditambahkan starter *Pediococcus acidiliactiti* terbukti relatif lebih efektif dalam menghambat tumbuhnya kontaminan. Hal ini dikarenakan penambahan bakteri asam laktat di awal proses akan mengurangi munculnya kontaminan yang akan mengurangi mutu produk secara keseluruhan.

Pengetahuan mengenai cara produksi pangan olahan yang baik ini perlu terus disosialisasikan pada pelaku produsen olahan pangan tradisional berbasis fermentasi. Diperlukan kerjasama semua pihak baik dari Pemerintah, Perguruan Tinggi, Industri dan pelaku produsen pangan tradisional untuk mengaplikasikan hal ini. Dengan melakukan cara produksi yang baik, tidak hanya menjaga mutu keamanan pangan namun juga dapat menghasilkan produk akhir yang konsisten pada tiap produksi.

b Teknologi Proses yang Efektif dan Efisien

Proses pengolahan produksi makanan tradisional berbasis fermentasi relatif banyak memakan waktu. Pada proses pengolahan tempoyak tradisional membutuhkan waktu dari 3 hingga 10 hari, pada proses fermentasi dadih memakan waktu 2 hari, dan pada growol menghabiskan waktu 4-6 hari. Selain

memakan waktu yang tidak sebentar, proses fermentasi juga cenderung bergantung pada kondisi lingkungan. Suhu optimal pertumbuhan mikroba tidak dapat dijaga secara konstan dan dimungkinkan di *range* waktu tertentu, suhu lingkungan tidak sesuai dengan suhu optimum pertumbuhan mikroba. Jika suhu dan waktu fermentasi tidak sesuai maka akan sangat mempengaruhi kualitas produk akhir dan memperpanjang proses fermentasi. Padahal, kondisi iklim tidak dapat diatur oleh manusia. Jika cuaca sedang bagus dan sesuai dengan suhu optimum mikroba, produk bisa sesuai dengan standar yang diharapkan. Jika kebetulan kondisi iklim sedang tidak stabil, dimungkinkan produk akhir yang dihasilkan tidak memiliki kualitas yang konsisten dan sesuai.

Salah satu alternatif untuk mendapatkan produk akhir yang sesuai dan bisa dicapai dalam waktu relatif lebih singkat, perlu dibuat sebuah teknologi baru yang bisa membuat proses lebih efisien dan efektif. Amri dan Putra (2012) dalam penelitiannya melaporkan bahwa teknologi inkubator dadih dapat mempersingkat proses pembuatan dadih. Inkubator ini dirancang lengkap dengan alat control suhu dan waktu. Alat pengontrol ini berfungsi untuk menjaga suhu inkubator tetap konstan pada temperature optimal mikroba asam laktat bisa tumbuh. Selain itu, alat ini juga bisa memberi informasi kepada petani dadih jika proses produksi dadih sudah selesai sempurna. Melalui inkubator ini, proses pembuatan produk dadih dapat dipersingkat dari yang tadinya memakan waktu sekitar 50 jam menjadi hanya 5 jam saja.

Selain dengan modifikasi alat, penggunaan starter yang berkualitas juga bisa membuat proses lebih singkat, efisien dan efektif. Yuliana (2007) melaporkan pengolahan fermentasi non spontan dengan penambahan starter *Pediococcus acidiliactiti* pada tempoyak terbukti memperpendek waktu fermentasi. Pada fermentasi spontan, proses pengolahan tempoyak dapat memakan waktu dalam rentang 3-5 hari. Sedangkan dengan menggunakan starter mikroba asam laktat dapat mengurangi waktu hingga 2-4 hari.

Tentunya contoh teknologi di atas sangat bisa dikembangkan untuk produk makanan tradisional berbasis fermentasi yang lain. Pengetahuan mengenai karakteristik mikroba, kondisi lingkungan dan mutu akhir produk harus

diperdalam. Pengembangan teknologi ini pun diharapkan tidak hanya berhenti di skala laboratorium, namun juga bisa diaplikasikan secara mudah oleh masyarakat Indonesia.

c. Intelligent dan Active Packaging *untuk Kontrol Kualitas dan Memperpanjang Umur Simpan*

Makanan tradisional berbasis fermentasi merupakan jenis *pangan perishable food* yang memerlukan penanganan bahan tersendiri agar dapat menjaga mutu produk serta menjamin keamanan pangan untuk konsumen. Salah satu teknologi pada dunia pangan yang dapat digunakan adalah *Intelligent Packaging. Intelligent packaging* atau kemasan pintar didefinisikan sebagai kemasan yang tidak hanya memberi fungsi pengemas sebagai pelindung dan penarik minat konsumen, namun memiliki fungsi tambahan dalam menambah nilai fungsional produk pangan. Mekanisme kemasan pintar diantaranya adalah dapat memberikan informasi mengenai kesegaran bahan. Kemasan ini mempunyai sistem yang dapat melakukan pendeteksian, pelacakan dan pengomunikasian mengenai kualitas kondisi produk sepanjang rantai pangan. Perubahan yang terjadi selama pada produk seperti perubahan suhu, pertumbuhan mikroba dan pH dapat diinformasikan melalui jenis kemasan ini.

Penelitian mengenai intelligent packaging masih terus dilakukan untuk melacak informasi mengenai kualitas produk pada konsumen. Warsiki, Rahyuningsih, & Anggraini (2016) telah meneliti penggunaan media XLD (*Xylose Lysine Deoxychoalate*) yang dapat memberikan informasi mengenai keberadaan Salmonella sp pada produk daging. Pada label kemasan pangan yang warnanya berubah dari warna transparan menjadi merah mengindikasikan adanya bakteri *Salmonella sp* yang tumbuh. Bakteri ini merupakan bakteri patogen yang tidak diinginkan dalam pangan. Pada penelitian lain menunjukkan bahwa kemasan aktif yang mengandung kayu secang dapat mendeteksi kesegaran mutu pada semangka. Warna secang yang berubah dari warna merah menjadi oranye menunjukkan ada perubahan mutu pada kualitas semangka yang ditinjau dari penurunan nilai pH, total padatan dan peningkatan nilai total asam pada semangka potong yang disimpan selama 2 hari (Suryanegara, Apriliyanti, Sasmita, & Nisa, 2021).

Selain itu, terdapat juga teknologi pengemasan yang biasa dikenal dengan *active packaging* atau kemasan aktif. Kemasan aktif didefinisikan sebagai kemasan yang dapat menambah umur simpan produk pangan. Mekanisme kemasan dalam memperpanjang umur simpan adalah dengan cara menambah atau menyerap zat tertentu dalam sistem pangan yang akan mempengaruhi metabolisme yang terjadi pada sistem pangan. Sistem kemasan aktif dapat dibagi menjadi dua yaitu sistem penjerap dan sistem pelepas. Kemasan sistem penjerap mampu membuang senyawa yang tidak dinginkan penyebab kerusakan bahan seperti oksigen, air, etilen, karbondioksida atau senyawa lainnya. Sedangkan kemasan sistem pelepas artinya kemasan ditambahkan senyawa aktif yang dapat memperpanjang umur simpan seperti antioksidan atau pengawet (Widiastuti, 2016). Reli, Warsiki, & Rahayuningsih(2017) meneliti pada produk tempoyak yang dikemas dalam sistem MAP (*modified atmosfer packaging*) memiliki umur simpan 84 hari. Umur simpan ini lebih lama dibandingkan dengan teknis pengemasan vakum dan non MAP. Teknik MAP dilakukan dengan cara memasukkan gas karbondioksida ke dalam kemasan sebanyak 67%- 69% dan oksigen sebanyak 5 – 6%.

Teknologi pengemasan di atas tentunya dapat menambah nilai ekonomi makanan tradisional Indonesia berbasis fermentasi. Pangan olahan yang disajikan dapat dimonitor kualitas mutunya menggunakan *intelligent packaging* serta dapat juga diperpanjang umur simpannya dengan *active packaging*. Teknologi pengemasan tersebut dapat meningkatkan kepercayaan masyarakat mengenai produk fermentasi serta menguntungkan bagi dunia industri makanan tradisional. Seperti yang kita tahu, banyak makanan tradisional Indonesia yang dijadikan buah tangan bagi pelancong luar daerah. Ke depan, konsumen tidak lagi mengkhawatirkan tentang produk pangan yang cepat rusak sebelum sampai daerah asal. Selain itu, konsumen juga menjadi tahu mengenai mutu produk pangan sebelum dikonsumsi.

KESIMPULAN

Indonesia patut berbangga memiliki banyak kekayaan budaya yang memiliki banyak manfaat untuk manusia. Salah satu hasil budaya tersebut adalah makanan tradisional berbasis fermentasi. Banyak penelitian yang telah melaporkan adanya potensi pangan fungsional pada produk makanan tradisional Indonesia. Produk makanan tradisional fermentasi yang diangkat pada artikel ini adalah growol, tempe, dadih dan tempoyak. Growol yang banyak dibuat oleh masyarakat Kulonprogo, Purworejo dan sekitarnya memiliki kandungan bakteri asam laktat yang dapat mencegah adanya diare, menurunkan indeks glikemik pada singkong sehingga baik untuk penderita diabetes dan memiliki serat tinggi. Selanjutnya adalah tempe yang merupakan produk pangan tradisional yang sudah banyak dihidangkan di meja-meja makan rakyat Indonesia. Tempe diketahui memiliki senyawa isoflavon yang berfungsi sebagai antioksidan, dapat menurunkan kolesterol serta menambah kandungan gizi mikro yang diujikan pada tikus percobaan. Dadih yang berbahan baku susu kerbau dapat mencegah kanker usus dan memiliki efek hipokolesterolemik (menurunkan kadar kolesterol). Tempoyak yang banyak ditemukan di daerah Sumatera dapat menurunkan kolesterol.

Tentunya ada berbagai tantangan dan peluang dalam melestarikan makanan tradisional. Tantangan yang perlu dihadapi adalah isu mengenai keamanan pangan. Pengolahan secara tradisional biasanya lebih rentan terhadap kontaminasi. Diperlukan usaha produksi yang sesuai dengan prinsip GMP (*Good Manufacturing Practices*) untuk menjaga mutu keamanan pangan. Selanjutnya adalah isu mengenai penggunaan teknologi yang digunakan dalam proses fermentasi. Diperlukan usaha-usaha cerdas untuk memperbaiki teknik pengolahan makanan tradisional sehingga proses produksi dapat lebih efektif dan efisien. Selain itu penggunaan kemasan pintar dan kemasan aktif juga akan meningkatkan nilai ekonomi makanan tradisional. Dengan kemasan pintar, konsumen dapat memonitor kualitas pangan selama berada pada rantai pangan. Melalui kemasan aktif, produk makanan tradisional dapat mempunyai umur simpan yang lebih lama.

DAFTAR PUSTAKA

Afrianto, S., & Wariyah, C. (2020). Karakteristik growol yang dibuat dengan variasi varietas ubi kayu (*Manihot esculenta crantz)* dan lama fermentasi. *Agritech*, 40(3), 254. https://doi.org/10.22146/agritech.50228

Aisyah, A., Kusdiyantini, E., & Suprihadi, A. (2014). Isolasi, karakterisasi bakteri asam laktat, dan analisis proksimat dari pangan fermentasi "Tempoyak." *Jurnal Akademika Biologi*, 3(2), 31–39.

Alvina, A., & Hamdani, D. (2019). Proses pembuatan tempe tradisional. *Jurnal Pangan Halal*, 1(1), 1-4.

Amri, K., & Putra, A. A. (2012). Introduksi incubator buatan untuk mempersingkat waktu pembuatan dadih. *Jurnal Teknik Mesin*, 9(1), 46–52. https://doi.org/10.30630/jtm.9.1.22

Astawan, M., Wresdiyati, T., Widowati, S., Bintari, S.H., & Ichsani, N. (2013). Karakteristik fisikokimia dan sifat fungsional tempe yang dihasilkan dari berbagai varietas kedelai. *Jurnal Pangan*, 22(3), 241–252.

Astuti, R., Aminah, S., & Syamsianah, A. (2014). Komposisi zat gizi tempe yang difortifikasi zat besi dan vitamin A pada tempe mentah dan matang. *Agritech*, 34(2), 151-159.

BPOM. (2016). Peraturan BPOM nomor 13 tahun 2016 tentang pengawasan klaim pada label dan iklan pangan olahan.

BPS. (2010). Kewarganegaraan, suku bangsa, agama dan bahasa sehari-hari penduduk indonesia: Hasil sensus penduduk 2010.

Chalid, S. Y., & Hartiningsih, F. (2013). Potensi dadih susu kerbau fermentasi sebagai antioksidan dan antibakteri. Prosiding Semirata FMIPA Universitas Lampung, August, 369–375. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28055.16801

Eni, R.A., Lestari, L. A., & Juffrie, M. (2010). Frekuensi konsumsi growol berhubungan dengan angka kejadian diare di Puskesmas Galur II Kecamatan Galur Kabupaten Kulonprogo Provinsi DIY. *Jurnal Gizi Klinik Indonesia*, 7(1), 27. https://doi.org/10.22146/ijcn.17612

Harmayani, E., Santoso,U., & Gardjito, M. (2016). *Makanan tradisional Indonesia*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Haruminori, A., Angelia, N., & Purwaningtyas, A. (2018). Makanan etnik melayu: tempoyak. *Jurnal Antropologi: Isu-Isu Sosial Budaya*, 19(2), 125. https://doi.org/10.25077/jaisb.v19.n2.p125-128.2017

Hasanuddin. (2010). Mikroflora pada tempoyak (the microflora of tempoyak*). Agritech*, 30(4), 218–222.

Koeswardhani, M.M., Rosandari, T., Rasyid, R., Saragih, R., Surono, IS., Tampubolon ES., Dharmawati, A., Sukotjo, S., Makosim, S. (2008). *Teknologi pengolahan pangan*. Tangerang Selatan: Universitas Terbuka

Marsono, Y. (2008). Prospek pengembangan makanan fungsional. *Jurnal Teknologi Pangan Dan Gizi*, 7(1), 19–27.

Mustarichie, R., Moektiwardoyo, M., Levita, J., Muhtadi, A., Subarnas, A., & Udin, L. Z. (2012). The research evidence of antioxidant and anti-cancer activity of genistein content in the indonesian traditional food (oncom) ethanol extract. *International Research Journal of Pharmaceutical and Applied Sciences* (IRJPAS), 2(25), 65–7365.

Nofia, Y., Wasita, B., & Susilawati, T. N. (2022). Elevated growol flour reduce fasting blood glucose, homa-ir and increase insulin level in rat model with Type 2 Diabetes Mellitus. *Media Gizi Indonesia*, 17(2), 151–158. https://doi.org/10.20473/mgi.v17i2.151-158

Nuraida, L. (2015). A review: Health promoting lactic acid bacteria in traditional Indonesian fermented foods. *Food Science and Human Wellness*, 4(2), 47–55. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2015.06.001

Pato, U. (2003). Potensi bakteri asam laktat yang diisolasi dari dadih untuk menurukan resiko penyakit kanker. *Jurnal Natur Indonesia*, 5(2) 162-166.

Pato, U.(2004). Potensi bakteri asam laktat yang diisolasi dari dadih untuk menurunkan kadar kolesterol darah. *Agritech*, 24(1), 1-8.

Pato, U., & Surono, I. S. (2013). Bile and acid tolerance of lactic acid bacteria isolated from tempoyak and their probiotic

potential Bile and acid tolerance of lactic acid bacteria isolated from tempoyak and their probiotic potential. *Journal of Agricultural Technology,* 9(7), 1849-1862

Pato, U., Surono, I. S., Koesnandar, & Hosono, A. (2004). Hypocholesterolemic effect of indigenous dadih lactic acid bacteria by deconjugation of bile salts. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 17(12), 1741–1745. https://doi.org/10.5713/ajas.2004.1741

Purwandari, U., Tristiana, G. R., & Hidayati, D. (2014). Gluten-free noodle made from gathotan flour: Antioxidant activity and effect of consumption on blood glucose level. *International Food Research Journal*, 21(5), 1951–1956.

Puspaningtyas, D. E., Sari, P. M., Kusuma, N. H., & Helsius SB, D. (2019). Analisis potensi prebiotik growol: kajian berdasarkan perubahan karbohidrat pangan. *Gizi Indonesia*, 42(2), 83. https://doi.org/10.36457/gizindo.v42i2.390

Putri, W. D. R., Haryadi, Marseno, D. W., & Cahyanto, M. N. (2012). Isolasi dan karakterisasi bakteri asam laktat amilolitik selama fermentasi growol, makanan tradisional Indonesia. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 13(1), 52–60.

Reli, R., Warsiki, E., & Rahayuningsih, M. (2017). Modifikasi pengolahan durian fermentasi (tempoyak) dan perbaikan kemasan untuk mempertahankan mutu dan memperpanjang umur simpan. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 27(1), 43–54. https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2017.27.1.43

Romadona, N.F. & Fitriyanti, S. (2013). The effect of steamed tempeg on total and LDL cholesterol in wistar male rats. *Obesity Research & Clinical Practice*, 7 Supplement 1, October 2012, p 36

Siallagan, D., Swamilaksita, P.D., & Angkasa, D. (2016). Pengaruh asupan Fe, vitamin A, vitamin B12, dan vitamin C terhadap kadar hemoglobin pada remaja vegan. *Jurnal Gizi Klinik Indonesia*, 13(2), 67. doi:10.22146/ijcn.22921

Sine, Y., & Soetarto, E.S. (2018). Perubahan kadar vitamin dan mineral pada fermentasi tempe gude (*Cajanus cajan L.). Jurnal Saintek Lahan Kering*, 1(1), 1-3. doi:10.32938/slk.v1i1.414.

Sudargo, T., Zuhrotun, F., Helmiyati, S., Kusuma, R.J., Arjuna, T., & Septiana,R.D. (2013). Tempe with iron fortification to overcome iron deficiency anemia. *Pakistan Journal of Nutrition*, 12 (9), 815-820.

Suryanegara, M. A., Apriliyanti, M. W., Sasmita, I. R. A., & Nisa, A. K. (2021). Kemasan pintar pendeteksi kesegaran buah semangka potong dari ekstrak kayu secang (*Caesalpinia sappan l.). ProFood,* 6(2), 736–741. https://doi.org/10.29303/profood.v6i2.140

Susilowati, A., Ghozali, A.M., & Maryati, Y. (2018). Mikrofiltrasi isolat tempe kedelai (glycine soja l.) dan distribusi partikelnya sebagai sumber asam folat. *Biopropal Industri,* 9(2), 61-69.

Usmiati, S., & Risfaheri. (2013). Pengembangan dadih sebagai pangan fungsional probiotik asli Sumatera Barat. *J. Litbang Pert*., 32(1), 20–29.

Warsiki, E., Rahayuningsih, M., & Anggarani, R. R. (2016). Media berindikator warna sebagai pendeteksi *Salmonella typhimurium*. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 26(3), 276–283.

Widiastuti, DR. (2016). Kajian kemasan pangan aktif dan cerdas (*Active and intelligent food packaging*). BPOM Indonesia. Retrieved from https://diklatbpom.files.wordpress.com/2015/04/kajian-kemasan-pangan-aktif-dan-cerdas_dwi-retno-w.pdf

Yuliana, N. (2007). Pengolahan durian (*Durio zibethinus*) fermentasi (tempoyak). J *Tek Ind Pert*.12 (2), 70-80.

KOMODITAS UMBI-UMBIAN SEBAGAI ALTERNATIF SUMBER KARBOHIDRAT

TUBERS AS AN ALTERNATIVE SOURCE OF CARBOHYDRATE

Eko Yuliastuti Endah Sulistyawati*, Athiefah Fauziyyah, Dini Nur Hakiki, Mohamad Rajih Radiansyah, Rina Rismaya, Mutiara Ulfah

Program Studi Teknologi Pangan, Jurusan pertanian, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

*eko@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Artikel ini bertujuan untuk mengkaji berbagai umbi-umbian yang memiliki potensi sebagai sumber alternatif karbohidrat. Metode penyusunan artikel menggunakan kajian pustaka. Pada saat ini komoditas lokal sumber karbohidrat yang utama di Indonesia adalah beras. Ketergantungan konsumsi pangan pada satu komoditas membuat kerentanan pangan. sehingga perlu dicari alternatif sumber karbohidrat untuk meningkatkan ketahanan pangan. Komoditas umbi-umbian mengandung karbohidrat yang cukup baik yang dapat digunakan sebagai alternatif sumber karbohidrat selain beras. Penelitian tentang olahan umbi-umbian menjadi berbagai produk pangan telah dilakukan tetapi hasil olahan pangan ini belum banyak diminati oleh masyarakat, sehingga perlu dilakukan upaya sosialisasi kepada masyarakat tentang pemanfaatan umbi-umbian sebagai komoditas sumber karbohidrat. Peningkatan konsumsi umbi-umbian sebagai sumber karbohidrat akan meningkatkan keanekaragaman produk pangan dan pada akhirnya akan meningkatkan ketahanan pangan di era society 5.0. Jenis umbi-umbian yang sudah dimanfaatkan masyarakat sebagai komoditas sumber karbohidrat adalah ubi kayu, ubi jalar, talas, gembili, gadung, ubi kelapa, garut, kimpul, dan porang. Bentuk olahan umbi-umbian yang telah dikembangkan oleh para peneliti adalah klepon ubi jalar, singkong keju, wingko ubi kayu, cassava blanca, brownies kukus ubi kayu, cake tape, mie mocaf,

mie umbi ganyong, roti manis, dan onde-onde ubi jalar. Umbi-umbi lain pada umumnya masih diolah secara tradisional dengan dikukus, digoreng, atau dibakar.

Kata Kunci: *alternatif, karbohidrat, umbi-umbian, sumber.*

ABSTRACT

This article aims to examine various tubers that have potential as alternative sources of carbohydrates. The method of compiling articles using literature review. At this time the main source of local commodity carbohydrates in Indonesia is rice. The dependence of food consumption on one commodity makes food security vulnerable, therefore it is necessary to find alternative sources of carbohydrates to increase food security. Commodity tubers contain carbohydrates that are quite good. Therefore, it can be used as an alternative source of carbohydrates other than rice. Research on processed tubers into various food products has been carried out. However, this processed food product has not been much in demand by the public, therefore it is necessary to make efforts to disseminate information to the public about the use of tubers as a carbohydrate source commodity. Increased consumption of tubers as a source of carbohydrates will increase the diversity of food products and will ultimately increase food security in the era of society 5.0. The types of tubers that have been used by the community as a carbohydrate source commodity are cassava, sweet potato, taro, gembili, gadung, coconut yam, arrowroot, kimpul, and porang. The processed forms of tubers that have been carried out by researchers are sweet potato klepon, cassava cheese, cassava wingko, cassava blanca, cassava steamed brownies, cake tape, mocaf noodles, canna tuber noodles, sweet bread, and sweet potato dumplings. Other tubers are generally still processed traditionally by steaming, frying, or grilling.

Keywords: *alternative, carbohydrates, tubers, sources.*

PENDAHULUAN

Jumlah penduduk Indonesia terus meningkat dari tahun ke tahun (Tabel 1). Keadaan ini diikuti dengan peningkatan kebutuhan komoditas pangan untuk memenuhi zat gizi semua penduduk. Zat gizi yang dibutuhkan oleh penduduk salah satunya adalah karbohidrat. Karbohidrat adalah sumber utama energi untuk tubuh. Untuk memenuhi karbohidrat masyarakat pada umumnya mengkonsumsi beras dan terigu. Di Indonesia, beras diperoleh dari hasil pertanian padi dengan sistem tanam dan syarat tumbuh tertentu, bahkan juga harus diimpor, sedangkan terigu diperoleh dari impor sepenuhnya.

Tabel 1. Jumlah Penduduk Indonesia

Provinsi di Indonesia	Jumlah Penduduk Menurut Provinsi di Indonesia (Ribu Jiwa)		
	2019	2020	2021
Aceh	5.372	5.275	5.334
Sumatera Utara	14.563	14.799	14936
Sumatera Barat	5.441	5.534	5.580
Riau	6.972	6.394	6. 494
Kep. Riau	2.190	2.065	2.118
Jambi	3.625	3.548	3.585
Sumatera Selatan	8.471	8.467	8.551
Kep. Bangka Belitung	1.489	1.456	1.473
Bengkulu	1.992	2.011	2.033
Lampung	8.448	9.008	9.082
DKI Jakarta	10.558	10.562	10.610
Jawa Barat	49.317	48.274	48.782
Banten	12.927	11.905	12.061
Jawa Tengah	34. 718	36.516	36.743
DI Yogyakarta	3.843	3.669	3.713
Jawa Timur	39.699	40.666	40.879
Kalimantan Barat	5.069	5.414	5.471
Kalimantan Tengah	2.715	2.670	2.702
Kalimantan Selatan	4. 244	4.074	4.123
Kalimantan Timur	3 .721	3.766	3.808

Provinsi di Indonesia	Jumlah Penduduk Menurut Provinsi di Indonesia (Ribu Jiwa)		
	2019	2020	2021
Kalimantan Utara	742	702	714
Sulawesi Utara	2.507	2.622	2.639
Gorontalo	1.203	1.172	1.181
Sulawesi Tengah	3.054	2.986	3.022
Sulawesi Selatan	8.851	9.074	9.140
Sulawesi Barat	1.380	1.419	1.437
Sulawesi Tenggara	2.705	2.625	2659
Bali	4.337	4.317	4.363
Nusa Tenggara Barat	5..070	5.320	5.390
Nusa Tenggara Timur	5.456	5.326	5.388
Maluku	1.803	1.849	1.863
Maluku Utara	1.256	1.283	1.299
Papua Barat	3.379	1.134	1.157
Papua	960	4.304	4.355
Indonesia	268.075	270.204	272.825

Sumber : Publikasi Provinsi Sulawesi Utara Dalam Angka, 2021

Sistem tanam dan syarat tumbuh tertentu untuk padi menyebabkan biaya produksi tinggi. Padi yang dihasilkan menjadi mahal, bahkan tidak terjangkau untuk golongan masyarakat kurang mampu. Usaha intensifikasi dan ekstensifikasi yang dilakukan di berbagai daerah belum menghasilkan padi sesuai jumlah kebutuhan seluruh penduduk sehingga diperlukan impor. Pertambahan jumlah penduduk juga mempersempit lahan pertanian untuk bertanam padi sehingga perlu dipikirkan komoditas lain untuk memenuhi kebutuhan karbohidrat dengan sistem tanam dan syarat tumbuh yang lebih toleran dengan keadaan tanah dan luas tanam yang ada. Dengan demikian biaya tanam bisa ditekan dan komoditas sumber karbohidrat dapat terpenuhi dengan harga terjangkau oleh konsumen.

Sejalan dengan konsep *society* (masyarakat) 5.0 yang menekankan aspek keselarasan antara perkembangan teknologi, kemajuan ekonomi dengan permasalahan sosial yang ada di masyarakat, maka diperlukan kajian dan riset terkait dengan pengembangan produk pangan yang mengarah kepada kesejahteraan dan kesehatan manusia (Hakiki et al.,

2021). Masyarakat sehat jika kebutuhan gizinya terpenuhi. Pemenuhan kebutuhan gizi khususnya karbohidrat dapat berasal dari berbagai komoditas pertanian. Komoditas dari familia umbi-umbian adalah salah satu komoditas yang perlu digali untuk dimanfaatkan sebagai alternatif sumber karbohidrat.

Indonesia memiliki berbagai komoditas umbi-umbian yang dapat digunakan sebagai alternatif sumber karbohidrat. Berbagai penelitian telah dilakukan, namun hasilnya belum banyak disosialisasikan ke masyarakat. Pada artikel ini akan diperkenalkan berbagai umbi-umbian lokal yang dapat dikonsumsi sebagai alternatif sumber karbohidrat dan berbagai hasil olahannya. Artikel ini disusun berdasarkan kajian pustaka dan hasil penelitian yang telah dilakukan.

PEMBAHASAN

1. Peran Karbohidrat untuk Kesehatan

Karbohidrat sebagai zat gizi merupakan nama kelompok zat-zat organik yang mempunyai struktur molekul berbeda-beda tetapi terdapat persamaan dari sudut kimia dan fungsinya. Semua karbohidrat terdiri atas unsur Carbon (C), Hidrogen (H), dan Oksigen (O_2). Karbohidrat adalah salah satu zat gizi yang diperlukan oleh manusia untuk menghasilkan energi bagi tubuh. Orang Indonesia membutuhkan karbohidrat antara 80-90% dari total kalori setiap hari. Selain berfungsi untuk penghasil energi dalam tubuh, karbohidrat mempunyai fungsi lain bagi tubuh, yaitu pemberi rasa manis pada makanan, penghemat protein, pengatur metabolisme lemak, dan membantu pengeluaran feses (Siregar, 2014).

Setiap satu gram karbohidrat menghasilkan energi 4 kalori. Karbohidrat di dalam tubuh terdapat dalam berbagai bentuk, yaitu:

a. glukosa berada dalam sirkulasi darah sebagai glukosa untuk keperluan energi segera,
b. glikogen yang terdapat di hati dan otot,
c. lemak yang disimpan sebagai cadangan energi dalam jaringan lemak.

Sistem syaraf sentral dan otak untuk keperluan energinya sangat tergantung pada ketersediaan glukosa. Karbohidrat pemberi rasa manis pada makanan berasal dari monosakarida dan disakarida. Setiap gula memiliki rasa manis yang berbeda. Fruktosa adalah gula paling manis (Siregar, 2014). Jika tubuh kekurangan karbohidrat sebagai sumber energi maka protein yang ada pada tubuh akan digunakan sebagai sumber energi. Fungsi utama protein sebagai zat pembangun akan terkalahkan. Kecukupan karbohidrat sebagai sumber energi akan menghemat penggunaan protein sebagai sumber energi. Selain itu karbohidrat juga berfungsi sebagai pengatur metabolisme lemak. Karbohidrat mencegah terjadinya oksidasi lemak yang tidak sempurna (Siregar, 2014).

Fungsi lain karbohidrat adalah membantu pengeluaran feses dengan cara mengatur peristaltik usus dan membentuk feses. Selulosa dan serat makanan mengatur peristaltik usus, sedangkan hemiselulosa dan pektin menyerap banyak air dalam usus besar sehingga memberi bentuk pada sisa makanan yang akan dikeluarkan dari usus. Serat makanan mencegah kegemukan, konstipasi, hemoroid, penyakit-penyakit diverticulosis, kanker usus besar, diabetes mellitus dan jantung yang berkaitan dengan kadar kolesterol (Siregar, 2014).

Mengacu pada pentingnya fungsi karbohidrat bagi tubuh, kekurangan atau kelebihan karbohidrat tentu akan mempengaruhi kondisi kesehatan tubuh. Berikut penyakit-penyakit yang berhubungan dengan pemenuhan karbohidrat pada tubuh (Siregar, 2014).

a. Penyakit Kurang Kalori dan Protein (KKP)
   Penyakit ini timbul bila kekurangan makan atau kelaparan. Kekurangan makan akan menimbulkan kurangnya asupan karbohidrat bagi tubuh. Penyakit ini timbul pada masa pertumbuhan anak-anak usia 2-4 tahun. Penyakit ini dapat juga menyerang orang dewasa. Gejala klinis pada orang dewasa ditandai dengan honger oedema atau busung lapar.
b. Penyakit Kegemukan
   Penyakit kegemukan timbul jika asupan energi tubuh melebihi kebutuhan tubuh. Kelebihan energi tubuh akan disimpan dalam jaringan lemak. Jaringan lemak subkutan di daerah perut bagian depan menebal pada

penderita obesitas. Obesitas pada laki-laki ditunjukkan oleh kelebihan 15% dari berat badan ideal dan 20% pada wanita sesuai dengan umurnya. Pada penderita obesitas organ-organ tubuh dipaksa untuk bekerja lebih berat karena harus menanggung kelebihan berat badan.

c. Diabetes Mellitus

Diabetes mellitus adalah penyakit metabolik yang disebabkan oleh interaksi berbagai faktor genetik, imunologik, lingkungan, dan gaya hidup. Dasar dari penyakit adalah defisiensi hormon insulin. Defisiensi insulin menyebabkan glukosa tidak dapat masuk ke dalam sel-sel, sehingga konsentrasinya meningkat di luar sel, juga di dalam cairan darah. Timbunan glukosa tersebut tidak dapat diubah menjadi energi untuk sel-sel. Dengan demikian glukosa menumpuk pada aliran darah selanjutnya dibuang melalui ginjal ke dalam urin yang akan mengakibatkan glucosuria. Karena glukosa yang ada tidak dapat diubah menjadi energi, maka kebutuhan energi tubuh dipenuhi dari protein dan lemak. Keadaan ini akan menimbulkan gluconeogenesis, asidosis dan ketosis.

d. *Lactose Intolerance*

Lactose intolerance disebabkan oleh adanya defisiensi enzim laktase. Keadaan ini akan mangakibatkan laktosa yang ada dalam tubuh tidak dapat dicerna pada saluran pencernaan. Kadar laktosa yang tinggi dalam saluran pencernaan akan bekerja sebagai laksan. Laksan ini akan menyebabkan diare.

2. Kondisi Beras sebagai Sumber Karbohidrat

a. Konsumsi Beras

Pada Tabel 2, dapat diketahui bahwa komoditas terbanyak yang dikonsumsi oleh setiap penduduk per tahun adalah beras. Jumlah kedua terbanyak setelah beras adalah ubi kayu, ubi jalar, kentang, jagung, diikuti talas, dan terakhir adalah umbi-umbian lainnya. Apabila setiap penduduk bersedia tidak setiap hari mengonsumsi beras dan diganti dengan ubi kayu, ubi jalar atau umbi lainnya, maka kebutuhan akan beras akan menurun. Dengan mengonsumsi umbi-umbian, diharapkan tingkat keanekaragaman pangan akan meningkat dan tentu saja akan mendukung ketahanan pangan.

Tabel 2. Rata-Rata Konsumsi per Kapita Seminggu dari Beberapa Macam Bahan Makanan Penting (Tahun 2016-2020)

No	Jenis Makanan	Tahun				
		2016	2017	2018	2019	2020
1	Beras (Kg/Kapita/ tahun)	100.571	97.641	96.563	94.473	94.020
2	Ubi Kayu (Kg/ Kapita/tahun)	3.806	6.355	4.739	4.363	4.827
3	Ubi jalar (Kg/Kapita/ tahun)	3.398	3.666	3.135	3.205	3.062
4	Kentang (Kg/Kapita/ tahun)	2.503	2.220	2.282	2.727	2.547
5	Jagung (Kg/ Kapita/tahun)	1.807	1.497	1.600	1.668	1.790
6	Talas (Kg/ Kapita/tahun)	0.417	0.755	0.345	0.544	0.450
7	Umbi lainnya (Kg/Kapita/ tahun)	0	0.079	0.081	0.083	0.091

Sumber : Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2020

Saragih (2015) menyatakan bahwa masyarakat Indonesia rata-rata mengkonsumsi beras sebanyak 139 kg/kapita/tahun. Konsumsi beras ini perlu diturunkan. Jika kita mengganti beras dengan sumber karbohidrat alternatif lain seperti jagung, ubi, sagu, atau kentang serta mengurangi konsumsi beras hingga menjadi 100 kg/kapita/tahun, maka kita telah berhasil mengurangi 30% konsumsi beras. Itu berarti, kita telah membantu petani memenuhi kebutuhan beras dari produksi dalam negeri dan mengurangi jumlah beras impor. Selain itu, penurunan konsumsi beras ini juga memiliki dampak ekologis. Jepensen (2015) menyatakan bahwa setiap produksi beras satu kilogram membutuhkan air sekitar 2.500-6.000 liter air. Penggunaan air ini dapat dihemat dan dialokasikan ke sektor-sektor yang lainnya (Wijayati, 2018).

Luas sawah di Indonesia adalah 8.087.393 hektar (Tabel 2), berdasarkan data pada tahun 2015 dari Biro Pusat Statistik, setiap hektar sawah menghasilkan padi 43,95 kuintal (Tabel 3). Produksi padi adalah 355.440.922 kuintal atau sama dengan 35.544.092.235 Kilogram (43,95 kuintal x 8.087.393 Ha.). Jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2021 adalah 255.500.000 jiwa (Anonim, 2021). Berdasarkan produksi padi tersebut, setiap jiwa memiliki persediaan padi 139 Kilogram (35.544.092.235 Kilogram dibagi 255.500.000 jiwa). Konsumsi padi/ beras di Indonesia termasuk tinggi. Pada tahun 2017, konsumsi beras per kapita di Indonesia tercatat hampir 139 kilogram (beras, per orang, per tahun). Untuk memenuhi kebutuhan beras di Indonesia, pemerintah mengambil kebijakan impor.

Salah satu sikap untuk mengatasi masalah ini, adalah dengan mengurangi ketergantungan pangan terhadap beras sebagai sumber karbohidrat. Berdasarkan kenyataan ini maka perlu dicari sumber pangan alternatif yang dapat menjadi substitusi pangan pokok beras sebagai sumber karbohidrat terbanyak yang dikonsumsi. Tindakan ini sejalan dengan pendapat Winarno (2018) yang menyatakan bahwa dunia sedang mencari sumber pangan alternatif yang berkelanjutan, yaitu sumber makanan dengan dampak yang kecil bagi lingkungan, tapi mampu memberi kontribusi besar bagi kebutuhan dan ketahanan pangan, serta gizi manusia. Dalam rangka mencari sumber pangan pokok alternatif untuk mensubtitusi beras akan dikaji komoditas umbi-umbian sebagai sumber karbohidrat.

Tabel 3. Produksi Padi per Hektar (Kuintal)

No	Provinsi	Tahun					
		2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	Aceh	2010	2011	2012	2013	2014	2015
2	Sumatera Utara	44,92	46,57	46,12	46,68	48,39	50,56
3	Sumatera Barat	47,47	47,62	48,56	50,17	50,62	51,74
4	Riau	48,02	49,37	49,71	49,82	50,06	50,25
5	Jambi	36,83	36,89	35,56	36,63	36,35	36,63
6	Sumatera Selatan	40,86	41,07	41,85	43,36	45,53	44,31
7	Bengkulu	42,53	43,13	42,81	45,96	45,26	48,67
8	Lampung	38,68	39,28	40,29	42,17	40,20	44,92
9	Kep. Bangka Belitung	47,54	48,45	48,32	50,26	51,18	51,49
10	Kep. Riau	27,21	28,71	28,01	27,83	23,62	22,85
11	DKI Jakarta	31,46	31,60	34,63	36,15	36,44	36,46
12	Jawa Barat	55,40	55,23	58,22	58,88	53,86	55,95
13	Jawa Tengah	57,60	59,22	58,74	59,53	58,82	61,22
14	Di Yogyakarta	56,13	54,47	57,70	56,06	53,57	60,25
15	Jawa Timur	56,02	55,89	61,88	57,88	57,87	60,65
16	Banten	59,29	54,89	61,74	59,15	59,81	61,13
17	Bali	50,39	49,11	51,45	52,92	52,95	56,61
18	Nusa Tenggara Barat	57,11	56,25	58,09	58,66	60,12	62,14
19	Nusa Tenggara Timur	47,41	49,45	49,69	50,08	48,80	51,71
20	Kalimantan Barat	31,80	30,30	34,91	32,80	33,46	35,61
21	Kalimantan Tengah	31,37	30,90	30,39	31,01	30,35	29,40
22	Kalimantan Selatan	26,27	28,49	30,01	32,84	34,57	35,07
23	Kalimantan Timur	39,10	41,67	42,05	42,34	42,05	41,87

No	Provinsi	Tahun					
		2010	2011	2012	2013	2014	2015
24	Kalimantan Utara	39,25	39,41	39,20	42,70	42,55	41,20
25	Sulawesi Utara	-	-	-	34,72	36,05	27,27
26	Sulawesi Tengah	48,76	48,83	48,46	50,10	48,91	49,05
27	Sulawesi Selatan	45,88	46,96	44,71	45,98	46,54	48,57
28	Sulawesi Tenggara	49,44	50,74	50,98	51,22	52,17	52,41
29	Gorontalo	42,19	41,34	41,47	42,23	4,84	47,07
30	Sulawesi Barat	55,20	51,87	48,01	52,01	50,20	55,51
31	Maluku	47,80	47,90	49,21	48,80	47,65	49,41
32	Maluku Utara	41,08	41,21	41,13	41,74	47,52	55,72
33	Papua Barat	34,47	36,60	36,91	37,57	34,01	35,11
34	Papua	36,19	35,38	39,03	39,76	40,21	42,12
35	Indonesia	38,45	39,45	37,16	41,30	43,09	43,95

Diolah dari Hasil Laporan Statistik Pertanian (SP) Tanaman Pangan, BPS
Padi : Kualitas produksi gabah kering giling
Jagung : Kualitas produksi pipilan kering
Kedelai & Kacang Tanah : Kualitas produksi biji kering
Ubi kayu & Ubi Jalar : Kualitas produksi umbi basah
Data Tahun 2015 adalah Angka Tetap.
Sumber : Badan Pusat Statistik, 2015

Tabel 4. Luas Lahan Sawah Menurut Provinsi (Ha), 2003–2015

No	Provinsi	Luas Lahan Sawah (Hektar)					
		2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	Aceh	313.649	307.556	30.8973	300.808	294.129	290.337
2	Sumatera Utara	468.724	467.138	448.722	438.346	433.043	423.465
3	Sumatera Barat	229.693	231.463	230.775	224.182	225.890	226.377
4	Riau	115.961	115.897	109.585	93.338	87.594	71.910
5	Jambi	112.434	113.757	113.379	113.546	101.195	94.735
6	Sumatera Selatan	611.386	629.355	610.314	612.424	616.753	620.632
7	Bengkulu	92.976	90.217	88.877	93.382	88.756	85.131
8	Lampung	345.437	350.949	364.111	360.237	363.055	377.463
9	Kep. Bangka Belitung	4.056	5.932	6.133	5.358	7.490	10.654
10	Kep. Riau	442	393	559	487	405	246
11	DKI Jakarta	1.312	1.098	1.001	895	778	650
12	Jawa Barat	930.268	930.507	923.575	925.042	924.307	912.794
13	Jawa Tengah	962.471	960.970	962.289	952.980	966.647	965.262
14	DIY Yogyakarta	55.523	55.291	55.023	55.126	54.417	53.553
15	Jawa Timur	1.107.276	1.106.449	1.105.550	1102921	1101765	1091752
16	Banten	196.744	197.165	195.951	194.716	200.480	199.492
17	Bali	81.425	80.164	79.399	78.425	76.655	75.922
18	Nusa Tenggara Barat	238.619	240.180	246.569	253.208	254.298	264.666
19	Nusa Tenggara Timur	142.479	144.574	148.810	169.063	172.954	177.238
20	Kalimantan Barat	307.016	318.581	322.541	330.883	323.959	330.724
21	Kalimantan Tengah	175.633	202.237	226.903	225.836	215.545	196.553
22	Kalimantan Selatan	436.318	457.155	451.869	440.429	431.437	450.152
23	Kalimantan Timur	82.796	90.518	90.887	63.323	55.485	57.000
24	Kalimantan Utara	-	-	-	21.762	21.775	21.448

No	Provinsi	Luas Lahan Sawah (Hektar)					
		2010	2011	2012	2013	2014	2015
25	Sulawesi Utara	52.789	56.181	56.173	56.157	60.475	55.820
26	Sulawesi Tengah	136.241	137.786	143.475	146.721	141.448	128.323
27	Sulawesi Selatan	572.089	576.559	592.376	602.728	623.139	628.148
28	Sulawesi Tenggara	83.356	85.585	92.280	95.378	96.826	103.812
29	Gorontalo	29.566	28.707	30.728	32.239	32.116	32.058
30	Sulawesi Barat	59.476	55.016	59.020	61.070	62.312	61.292
31	Maluku	11.451	14.085	15.972	15.042	13.519	13.394
32	Maluku Utara	9.478	9.093	9.359	10.510	10.516	11.802
33	Papua Barat	7.711	7.648	8.330	9.587	9.587	10.126
34	Papua	27.757	27.756	27.756	42.350	42.843	44.462
35	Indonesia	8.002.552			8.128.499	8.111.593	8.087.393

Diolah dari Hasil Laporan Statistik Pertanian (SP) Tanaman Pangan, BPS.
Tahun 2014 adalah angka sementara.
Data dikutip dari Publikasi Statistik Indonesia.
Sumber : Badan Pusat Statistik, 2014

b. Akses Konsumen kepada Beras

Pada Tabel 5 diketahui bahwa persentase pengeluaran per kapita sebulan untuk padi-padian lebih tinggi dari pada umbi-umbian. Padahal bila kita mempertimbangkan harga umbi-umbian lebih murah daripada harga beras, maka seharusnya masyarakat dapat membeli umbi-umbian sebagai alternatif pangan untuk mensubstitusi beras. Umbi-umbian memiliki berbagai jenis, diantaranya adalah ubi jalar. Ada beberapa sebab umbi-umbian belum diminati oleh masyarakat, yaitu kurangnya sosialisasi manfaat dan kandungan zat gizi umbi-umbian bagi pemenuhan kebutuhan zat gizi tubuh. Jika sosialisasi ini dilakukan maka masyarakat akan lebih mengenal manfaat umbi-umbian sebagai alternatif sumber karbohidrat selain beras.

Tabel 5. Rata-Rata Pengeluaran Perkapita Seminggu di Daerah Perkotaan Menurut Komoditi Makanan dan Golongan Pengeluaran per Kapita Seminggu (Rupiah/Kapita/Minggu), 2018-2021

Kelompok Barang	Tahun			
	2018	2019	2020	2021
Padi-padian	14.183	13.824	14.239	15.180
Umbi-umbian	1.156	1.203	1.332	1567

Sumber : Badan Pusat Statistik, 2022

c. Ketersediaan Umbi-umbian

Jumlah penduduk di Indonesia pada tahun 2015 adalah 255.500.000 jiwa. Produksi ubi jalar di Indonesia pada tahun 2015 adalah 2.297.634 ton sama dengan 2.297.634.000 kilogram. Untuk setiap jiwa tersedia 8,99 Kilogram. Hal ini disebabkan oleh luas tanah yang digunakan untuk memproduksi umbi-umbian lebih kecil bila dibandingkan luas tanah yang digunakan untuk memproduksi padi. Luas tanah untuk budidaya umbi-umbian diharapkan bisa ditingkatkan bila konsumen umbi-umbian juga meningkat.

d. Akses Konsumen kepada Umbi-Umbian

Pada Tabel 5 diketahui bahwa persentase pengeluaran per kapita sebulan untuk padi-padian lebih tinggi dari pada umbi-umbian. Pada tahun 2021 pengeluaran konsumsi terhadap padi-padian 9 kali lipat lebih tinggi dibanding dengan konsumsi umbi-umbian. Namun, ke depan minat masyarakat kepada umbi-umbian dapat meningkat seiring dengan adanya sosialisasi tentang manfaat dan kandungan zat gizi dari berbagai penelitian yang sudah dilakukan.

3. Alternatif Umbi-umbian sebagai Sumber Karbohidrat

Menurut Estiasih, Putri, & Waziiroh (2019), umbi-umbian dapat dikelompokkan dalam 2 jenis, yaitu jenis umbi-umbian yang umum dikonsumsi dan umbi-umbian minor. Jenis umbi-umbian yang umum dikonsumsi adalah ubi kayu dan ubi jalar sedangkan golongan umbi-umbian minor adalah umbi-umbian yang jarang dikonsumsi. Adapun jenis umbi-umbian minor adalah gembili, gadung, ubi kelapa, garut, kimpul, dan porang.

a. Evaluasi Zat Gizi Alternatif Pangan Pokok

Sebagai bahan pertimbangan konsumen agar bersedia mengonsumsi umbi-umbian dibandingkan dengan beras sebagai sumber alternatif karbohidrat adalah pertimbangan zat gizinya. Pada Tabel 6, dipaparkan kandungan karbohidrat berbagai jenis umbi-umbian dibandingkan dengan kandungan karbohidrat beras giling. Sente, talas segar dan umbi uwi, segar memiliki kandungan karbohidrat lebih tinggi daripada beras giling, mentah, sedangkan umbi-umbian yang lain memiliki kandungan karbohidrat lebih rendah dari beras giling mentah. Keadaan ini menjadi pertimbangan untuk memperhitungkan jumlah konsumsi umbi-umbian apabila konsumen akan mengkonsumsi umbi-umbian, agar kecukupan gizi karbohidrat tetap tercukupi.

Tabel 6. Kandungan Zat Gizi Beras dan Berbagai Jenis Umbi-umbian (100 gram)

Nama pangan	Nama Latin	Kandungan Karbohidrtat (CHO)	Satuan	Ukuran Saji (Gram)
Beras giling, mentah	*Oryza sativa*	77,1	gr	100
Arrowroot, segar	*Maranta arundinacea*	24,1	gr	100
Batatas gembili, segar	*Dioscorea esculenta*	16,0	gr	100
Belitung, talas, segar	*Xanthosoma sagittifolium*	34,2	gr	100
Bentul (Komba), talas, segar	*Colocasia esculenta*	20,9	gr	100
Gadung, ubi, segar	*Dioscorea hispida*	23,5	gr	100
Ganyong, segar	*Canna edulis*	18,4	gr	100
Gembili, ubi, segar	*Dioscorea esculenta*	31,3	gr	100
Hofa/Ubi hutan, segar		29,5	gr	100

Nama pangan	Nama Latin	Kandungan Karbohidrtat (CHO)	Satuan	Ukuran Saji (Gram)
Kaburan, ubi, segar	*Dioscorea esculenta*	32,2	gr	100
Kentang hitam, segar	*Plectranthus rotundifolius*	33,7	gr	100
Kentang, segar	*Solanum tuberosum*	13,5	gr	100
Ketela pohon/ singkong, segar	*Manihot esculenta*	36,8	gr	100
Sente, talas, segar	*Alocacia macrorrhizos*	84,7	gr	100
Suweg, talas, segar	*Amorphophallus paeoniifolius*	17,2	gr	100
Talas bogor, segar	*Colocasia esculenta*	25,0	gr	100
Talas pontianak, segar	*Colocasia esculenta*	36,4	gr	100
Talas viqueque, segar		25,9	gr	100
Ubi cilembu		44,3	gr	100
Ubi jalar manis, segar	*Manihot esculenta*	18,8	gr	100
Ubi jalar merah, segar	*Ipomoea batatas*	35,4	gr	100
Ubi jalar putih, segar	*Ipomoea batatas*	20,6	gr	100
Ubi jalar tinta/ kemayung		25,6	gr	100
Ubi jalar, kuning, segar	*Ipomoea batatas*	25,1	gr	100
Umbi Uwi, segar		82,3	gr	100

Sumber : Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2018

b. Olahan Umbi-umbian

Agar masyarakat tertarik untuk mengkonsumsi olahan pangan dari komoditas umbi-umbian perlu disosialisasikan berbagai olahan pangan dari umbi-umbian dari berbagai

penelitian. Olahan pangan yang disosialisasikan ke masyarakat sebaiknya tidak hanya olahan tradisional tetapi juga olahan pangan yang kekinian dan disukai olah kaum muda.

Berikut olahan pangan yang dapat disosialisasikan ke masyarakat.

1) Klepon Ubi jalar

Jajanan klepon biasanya dibuat dari tepung beras. Untuk meningkatkan peran ubi jalar sebagai alternatif pengganti beras telah dilakukan pembuatan klepon dengan subsitusi ubi jalar. Hasil evaluasi sensori pada penelitian ini menunjukkan bahwa sensori warna normal, tekstur normal, aroma normal, rasa agak disukai, dan keseluruhan kriteria penerimaan agak disukai (Sari, Sugita, & Wiadyani, 2013).

Komposisi klepon dari ubi jalar terdiri dari ubi jalar (kuning, putih atau ungu), gula pasir, tepung tapioka, kelapa parut, gula Jawa, bubuk vanili, dan daun pandan. Cara pembuatannya dengan proses perebusan dan pengukusan. Klepon ubi jalar dapat dihidangkan sebagai makanan selingan yang kaya gizi.

2) Singkong Keju

Singkong keju adalah makanan yang diharapkan dapat mengakomodasi selera masyarakat yang suka dengan keju. Masyarakat menyukai rasa keju sebagai rasa kekinian yang sedang "trendi". Biasanya keju digunakan pada makanan dari Eropa, Australia, dan bahkan Amerika. Penambahan keju pada singkong diharapkan dapat menaikkan citra singkong dan meningkatkan daya terima konsumen terhadap singkong. Menurut Reiz, Sampoerno, & Harnita (2017), konsumen singkong keju merek D-9 dari Salatiga menyatakan bahwa, produk yang Singkong Keju D-9 Salatiga memiliki kelezatan yang unik, yaitu perpaduan antara makanan tradisional yang gurih dan parutan keju yang lezat.

Bahan utama singkong keju adalah ubi kayu kupas, keju, garam, air, dan minyak goreng. Pengolahan singkong keju diawali dengan cara perebusan dilakukan dalam air mendidih selama 15 menit dengan menambahkan keju dan garam. Setelah didinginkan hasil rebusan ubi kayu dan kemudian dimasukkan ke dalam freezer minimal

selama 2 jam. Singkong beku digoreng sampai matang dengan api kecil. Lalu Singkong ditiriskan dari minyak dengan peniris minyak *(spinner)* selama 5 menit. Setelah itu singkong keju siap untuk dikonsumsi (Ginting, Utomo, & Yulifianti, 2015).

3) Wingko Ubi Kayu

Wingko adalah salah satu makanan tradisional yang dibuat dari tepung ketan. Tepung ketan termasuk komoditas dengan harga mahal. Untuk menekan biaya produksi wingko dari tepung ketan banyak pengusaha yang memanfaatkan ubi kayu. Pemanfaatan ubi kayu untuk bahan wingko, selain untuk menekan harga produksi diharapkan dapat dan meningkatkan keanekaragaman produk ubi kayu (singkong). Pengusaha wingko dengan merek Semar di Semarang menggunakan berbagai varian produk berdasarkan bahan yang digunakan. Bahan tersebut diantaranya adalah labu kuning dan ubi kayu. Wingko dengan bahan ubi kayu menjadi produk favorit konsumen (Muhtarom, Nizarudin, Siswanto, & Fitriyah, 2014).

Bahan yang digunakan untuk membuat wingko ubi kayu adalah ubi kayu, nasi tanak, kelapa parut, gula, serbuk vanili, dan garam. Pengolahan wingko ubi kayu dimulai dengan pengupasan kulit, pencucian, pemotongan ubi kayu menjadi ukuran sedang, pengukusan, dan penirisan. Tahap selanjutnya adalah mencampur ubi kayu kukus dengan nasi tanak, kelapa parut, gula, vanili, dan garam. Bentuk adonan dibuat menjadi bulat-bulat dan diletakkan pada loyang. Kemudian dilakukan pengovenan dengan suhu 160^{0}C selama 45 menit. Wingk yang telah matang, dapat dikemas dan siap dikonsumsi (Muhtarom, Nizarudin, Siswanto, & Fitriyah, 2014).

4) Casssava Blanca

Cassava blanca adalah salah satu bentuk olahan dari bahan ubi kayu yang relatif mudah dibuat. Bahan yang digunakan untuk membuat makanan ini adalah ubi kayu yang sudah diparut kasar, jagung manis rebus, gula pasir, kelapa muda parut, garam, dan ekstrak daun suji. Pengolahan adalah dengan mencampur semua bahan, masukkan ke dalam cetakan, selanjutnya dikukus selama

15 menit. Setelah matang, siap untuk dikonsumsi (Ginting, Utomo, & Yulifianti, 2015).

5) Brownies Kukus Ubi Kayu

Brownies adalah bolu coklat yang terbuat dari tepung terigu, lemak, telur, gula dan cokelat. Pemasakan brownies ada dua metode yaitu dengan pemanggangan atau pengukusan. Brownies merupakan makanan yang dikenal luas oleh masyarakat Indonesia (Putri, Wulandari, & Mustofa, 2020). Brownies biasanya menggunakan tepung terigu berprotein rendah, karena tidak memerlukan pengembangan yang maksimal (Siti, 2015). Berdasarkan karakteristik brownies tersebut dikembangkan brownies kukus dari ubi kayu.

Bahan untuk membuat brownies kukus adalah ubi kayu parut yang sudah diperas airnya, gula halus, margarin, coklat masak, coklat bubuk, susu bubuk, dan telur. Teknik pengolahannya adalah dengan mengocok gula dan margarin sampai mengembang, selanjutnya ditambahkan telur satu per satu. Setelah tercampur dilakukan penambahan ubi parut, coklat masak yang sudah dicairkan dengan margarin. Adonan kemudian dituangkan ke dalam Loyang dan dilakukan pengukusan selama 40 menit. Setelah matang brownies kukus siap dikonsumsi (Ginting, Utomo, & Yulifianti, 2015).

6) Cake Tape

Tape adalah hasil fermentasi ubi kayu. Bentuk tape lebih empuk dan beraroma. Bila tape digunakan sebagai bahan olahan pangan akan memberikan aroma yang khas. Cake tape adalah salah satu bentuk pangan yang disukai oleh masayarakat di Indonesia. Komposisi cake tape terdiri dari tape singkong yang dihaluskan, tepung terigu, tepung ubi kayu, gula pasir, margarin yang dilelehkan, telur, TBM, dan keju parut. Adapun tahap pengolahannya adalah sebagai berikut. Telur, gula pasir, dan TBM dikocok hingga berwarna putih dan mengembang. Selanjutnya ditambahkan tape halus, diaduk rata. Setelah itu ditambahkan terigu dan tepung ubi kayu, dan diaduk rata. Adonan dimasukkan ke dalam ke loyang dan dapat ditaburi keju parut. Terakhir, dilakukan pengovenan pada suhu 180°C selama 45 menit. Setelah matang, cake tape siap dikonsumsi (Ginting, Utomo, & Yulifianti, 2015).

7) Mie Mocaf

Mie adalah makanan yang banyak digemari oleh semua kalangan. Pada umumnya mie dibuat dari tepung terigu. Untuk mengurangi ketergantungan bahan pangan dari komoditas impor maka dibuatlah mie dengan substitusi tepung mocaf. MOCAF (*Modified Cassava Flour*) atau tepung ubi kayu termodifikasi merupakan salah satu produk pati termodifikasi yang telah banyak dimanfaatkan pada berbagai produk pangan. Modifikasi pati dilakukan dikarenakan dalam penggunaannya, pati alami memiliki beberapa kelemahan yang ditunjukkan dengan munculnya karakteristik yang tidak diinginkan pada kondisi pH, suhu, dan tekanan tertentu. Modifikasi pati dapat memperbaiki karakteristik yang dihasilkan (Putri, Wulandari, & Mustofa, 2018).

Bahan yang digunakan untuk membuat mie mocaf adalah tepung mocaf, tepung terigu, garam dan telur. Teknik pembuatan mie mocaf adalah dengan mencampurkan semua bahan sampai rata, selanjutnya dibentuk menjadi lembaran dengan menggunakan alat penggiling mie. Setelah lembaran rata dan halus dicetak menjadi bentuk mie. Selanjutnya dikukus selama 3 menit dengan posisi tegak. Tahap berikutnya dioven dengan suhu 70°C selama 4 jam dengan posisi tegak. Setelah terbentuk mie kering, maka mie siap dikemas dan untuk dipasarkan (Ginting, Utomo, & Yulifianti, 2015).

8) Mie dari umbi ganyong

Secara tradisonal umbi ganyong dikonsumsi dengan cara merebus, menggoreng, atau membakarnya. Umbi dan tepung ganyong mempunyai kandungan gizi yang tidak kalah dibandingkan dengan tepung terigu. Bahkan kandungan kalsium dan zat besi pada umbi ganyong lebih tinggi dibandingkan dengan tepung terigu. Ini mengindikasikan bahwa umbi ganyong dan produk olahannya sangat tepat dikonsumsi bagi balita, anak-anak, usia lanjut, dan penderita kekurangan zat besi (Ratnaningsih, 2010). Berdasarkan karakteristik gizi umbi ganyong tersebut perlu dibuat olahan pangan yang digemari oleh masyarakat, salah satunya adalah mie dari ubi ganyong.

Bahan mie basah tepung ganyong adalah tepung terigu, tepung ganyong, buah pepaya, telur, garam, minyak kelapa sawit. Semua bahan dicampur dan diaduk sampai kalis. Selanjutnya adonan dicetak dengan pencetak mie (Wijaningsih, Swamilaksa, & Melani, 2009).

9) Roti manis

Roti adalah salah satu produk olahan pangan yang banyak digemari oleh masyarakat. Roti selalu identik dengan tepung terigu. Untuk mengurangi penggunaan komoditas impor terigu, diupayakan melakukan substitusi tepung terigu dengan mocaf untuk pembuatan roti manis. Bahan untuk membuat roti manis adalah mocaf, tepung terigu, ragi instan, gula halus, susu bubuk, kuning telur, susu kental manis, air, garam, margarin, baking powder, dan maizena. Tahap pertama pembuatan roti manis adalah membuat biang roti dari dengan melarutkan ragi dalam air. Selanjutnya mocaf, tepung terigu, larutan ragi, gula, baking powder, maizena, garam, margarin cair, susu bubuk diaduk sampai kalis dan diamkan selama 30 menit. Adonan dibagi dengan berat masing-masing 30 gram, kemudian dibentuk menjadi bulatan, dan didiamkan selama 10 menit. Adonan ditekan agar gas keluar dan dibentuk bulat lagi dan diamkan selama 90 menit. Permukaan roti diolesi dengan susu kental manis. Dan terakhir dilakukan pengovenan dengan suhu 180^{0}C selama 45 menit (Ginting & Suprapto, 2018).

10) Onde-onde Ubi Jalar

Onde-onde adalah makanan tradisional yang banyak digemari masyarakat. Biasanya, onde-onde dibuat dari tepung ketan. Onde-onde dapat dibuat dengan menggunakan tepung umbi-umbian sebagai substitusi dari tepung ketan. Bahan-bahan yang digunakan untuk membuat onde-onde adalah pasta ubi jalar ungu, tapioka, tepung ketan, gula, wijen, air hangat, kacang hijau kupas kulit, gula pasir, dan garam. Pembuatannya yaitu dengan membuat adonan terlebih dahulu. Setelah adonan kulit siap kemudian diisi dengan bahan isian dan dibentuk bulat-bulat, dan dilumuri dengan wijen. Selanjutnya digoreng dalam minyak dengan api kecil. Jika sudah mengapung berarti onde-onde sudah matang, dan siap untuk dikonsumsi (Ginting, Utomo, & Yulifianti, 2015).

11) Es Puter Ubi Jalar Ungu
Es puter adalah salah satu makanan yang banyak disukai oleh semua kalangan. Es puter memiliki tampilan seperti es *cream* tetapi memiliki tekstur lebih kasar dan sumber lemak yang digunakan berasal dari santan kelapa. Untuk menambah minat konsumsi ubi-ubian, maka dimanfaatkanlah ubi jalar ungu untuk pada pembuatan es puter. Bahan untuk membuat es puter ini adalah pasta ubi jalar ungu, santan kelapa, gula pasir, tape ketan atau kelapa muda. Pembuatan es puter dilakukan dengan mencampurkan gula dan santan, selanjutnya direbus dan didinginkan. Setelah dingin, dicampur dengan pasta ubi ungu kemudian diblender. Setelah campuran ini rata dan halus, dihentikan proses blender, dan ditambahkan dengan tape ketan atau kelapa muda. Dimasukkan ke dalam freezer, setelah agak beku baru kemudian dimikser. Proses pendinginan dan mikser adonan dilakukan hingga 2 sampai 3 kali (Ginting, Utomo, & Yulifianti, 2015).

KESIMPULAN

Jenis umbi-umbian banyak tumbuh di Indonesia. Kandungan karbohidrat pada umbi-umbian dapat digunakan sebagai alternatif sumber karbohidrat selain beras. Berbagai penelitian tentang manfaat umbi-umbian telah dilakukan. Berdasarkan penelitian diketahui bahwa berbagai bentuk umbi-umbian dapat dimanfaatkan pada berbagai produk pangan. Komoditas umbi-umbiaan dalam berbagai bentuk turunannya telah digunakan dalam produksi makanan modern maupun tradisional. Berbagai produk pangan dan produk turunan dari umbi-umbian telah dibuat namun masih perlu sosialisasi kepada masyarakat luas agar lebih mengenal variasi olahan umbi-umbian, kandungan zat gizi, dan manfaatnya bagi tubuh. Dengan meningkatkan konsumsi masyarakat pada komoditas umbi-umbian, diharapkan ketahanan pangan akan meningkat karena masyarakat tidak hanya bergantung pada komoditas beras sebagai sumber karbohidrat.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Pusat Statistik. (2014). Luas Lahan Sawah Menurut Provinsi (Ha), 2003–2015. Retrieved from https://bps.go.id/linkTableDinamis/view/id/895.

Badan Pusat Statistik (2015). Produk Olahan Aneka Umbi. Retrieved from https://balitkabi.litbang.pertanian.go.id/wp-content/uploads/2015/04/buku%20resep%202015%20web.pdf,

Estiasih, E., Putri, W.D. R.,& Waziiroh, E. (2017). *Umbi-umbian dan Pengolahannya.* Malang: *UB Press*.

Ginting, E., Utomo, J.S., & Yulifianti, R. (2015). Produk Olahan Aneka Umbi Ubi kayu, Ubi jalar, ganyong, Suweg, Kimpul, Talas. Malang: Balai Penelitian Tanaman Aneka Kacang dan Umbi.

Ginting, E., & Suprapto. (2018). Pemanfaatan pati ubi jalar sebagai substitusi terigu pada pembuatan roti manis. Malang: Balai Penelitian Tanaman Kacang-kacangan dan Umbi. Retrieved from https://repository.ipb.ac.id/jspui/bitstream/123456789/25937/1/prosiding_seminar_teknologi_inovatif_pascapanen-10.pdf.

Hakiki, D. N., Fauziyyah, A., Yuliastuti, E., & Radiansyah, M. R. (2021). *Science and Technologie for Society 5.0*. Tangerang Selatan: Universitas Terbuka.

Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2018). Data Komposisi Pangan Indonesia. Retrieved from https://www.panganku.org/id-ID/semua_nutrisi. https://www.panganku.org/id-ID/semua_nutrisi.

Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2020).(Retrieved from https://www.panganku.org/id-ID/semua_nutrisi.

Badan Pusat Statistik. (2022). Rata-rata Pengeluaran Perkapita Seminggu di Daerah Perkotaan Menurut Komoditi Makanan dan Golongan Pengeluaran per Kapita Seminggu (Rupiah/Kapita/Minggu), 2020-2021. Retrieved from https://www.bps.go.id/indicator/5/2091/1/rata-rata-pengeluaran-perkapita-seminggu-di-daerah-perkotaan-menurut-komoditi-makanan-dan-golongan-pengeluaran-per-kapita-seminggu.html.

Muhtarom, Nizarudin, Siswanto, J., & Fitriyah, I., S. (2014). Brand "wingko semar" traditional culinary exotism from semarang (made from pumpkin and cassava) with educational nuance of shadow puppet. *Global Advanced Research Journal of Management and Business Studies,* 3 (8), 361-365. https://www.academia.edu/8493816/Brand_Wingko_Semar_Traditional_Culinary_Exotism_From_Semarang_Made_From_Pumpkin_And_Cassava_With_Educational_Nuance_Of_Shadow_Puppet.

Publikasi Provinsi Sulawesi Utara Dalam Angka. (2021). Jumlah Penduduk Menurut Provinsi di Indonesia (Ribu Jiwa), 2019-2021. Retrieved from https://sulut.bps.go.id/indicator/12/958/1/jumlah-penduduk-menurut-provinsi-di-indonesia.html.

Putri, N., A., Herlina, H., & Subagiao, A. (2018). Karakteristik MOCAF (modified cassava fluor) berdasarkan metode penggilingan dan lama fermentasi. Jurnal *Agroteknologi*, 12 (1), 76-89.

Putri, M., B., Wulandari, Y., W., Mustofa, A. (2020). Karakteristik brownies kukus tepung jewawut (setarica italica) dan tepung maizena dengan pengaruh lama proses pengukusan. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 5 (1),1-11. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/341717012_KARAKTERISTIK_BROWNIES_KUKUS_TEPUNG_JEWAWUT_Setarica_italica_DAN_TEPUNG_MAIZENA_DENGAN_PENGARUH_LAMA_PROSES_PENGUKUSAN.

Ratnaningsih, N., Nugraheni, M., Handayani, T.H.W., & Chayati, I. (2010) perbaikan mutu dan diversifikasi produk olahan umbi ganyong dalam rangka peningkatan ketahanan pangan. Retrieved from http://staffnew.uny.ac.id/upload/132300107/pengabdian/upload-ibmganyongnov2010docx2.pdf.

Reiz, A.,W., V., Sampoerno, & Harnita, P., C. (2017). Disorientasi bauran komunikasi pemasaran singkong keju D-9 Salatiga. Retrieved from https://repository.uksw.edu/bitstream/123456789/13387/5/BOOK_Alfian%20Wemfy%20VR%2C%20Sampoerno%2C%20Pratiwi%20CH_Disorientasi%20Bauran.pdf.

Sari, D.B., Sugita, I.M., & Wiadyani, A.A.I.S., (2013). Pengaruh substitusi dengan ubi jalar ungu terhadap karakteristik "klepon" yang dihasilkan. Retrieved from http://download.portalgaruda.org/article.php?article=162697&val=948&title=PENGARUH%20SUBSTITUSI%20TEPUNG%20BERAS%20DENGAN%20UBI%20JALAR%20UNGU%20TERHADAP%20KARAKTERISTIK%20%C3%A2%E2%82%AC%C5%93KLEPON%C3%A2%E2%82%AC%20%20YANG%20DIHASILKAN.

Siregar, S. S. (2014). Karbohidrat. *Jurnal Ilmu Keolahragaan*, 13(2), 38–44. Retrieved from http://digilib.unimed.ac.id/1386/1/Fulltext.pdf.

Siti, F.K. (2015). Eksperimen pembuatan brownies tepung terigu substitusi tepung jerami nangka. (Skripsi). Semarang: Universitas Negeri Semarang.

Wijaningsih. K.R., Swamilaksa, P.D., & Melani, V. (2009). Pemanfaatan tepung ganyong (canna edulis kerr.) dan puree pepaya (carica papaya l.) terhadap mutu organoleptik dan nilai gizi mi buaya. Retrieved from https://digilib.esaunggul.ac.id/public/UEU-Undergraduate-11285-JURNAL.Image.Marked.pdf.

Winarno, F.G. (2018). Kelor dan serangga menjadi alternatif. Retrieved from http://www.pressreader.com/indonesia/200180907/281792809912614.

POTENSI TEPUNG UMBI – UMBIAN TERMODIFIKASI SEBAGAI ALTERNATIF PENGGANTI TERIGU

POTENTIAL OF MODIFIED TUBERS FLOUR AS AN ALTERNATIVE TO WHEAT SUBSTITUTE

Mutiara Ulfah*, Eko Yuliastuti Endah Sulistyawati, Athiefah Fauziyyah, Rina Rismaya, Dini Nur Hakiki, Mohamad Rajih Radiansyah

Program Studi Teknologi Pangan, Jurusan pertanian, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

*mutiaraulfah@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Artikel ini bertujuan membahas potensi tepung dan pati umbi-umbian termodifikasi sebagai alternatif pengganti terigu. Potensi umbi-umbian sebagai sumber karbohidrat lokal Indonesia sangat besar yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku aneka produk pangan pengganti terigu, sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada konsumsi terigu. Sejalan dengan era society 5.0 diperlukan inovasi dalam bidang pangan untuk meningkatkan kualitas tepung umbi-umbian yang dapat dimanfaatkan oleh masyarakat. Karakteristik tepung umbi-umbian yang berbeda dengan tepung terigu sehingga perlu penerapan beberapa metode untuk meningkatkan sifat fungsional tepung dan pati umbi-umbian yang dapat mendekati karakter tepung terigu atau yang diinginkan sesuai dengan permintaan konsumen dan yang dibutuhkan oleh industri. Metode-metode modifikasi yang telah diaplikasikan pada umbi – umbian tersebut dapat dilakukan secara fisik, biologis, kimiawi, ataupun gabungan dari beberapa metode tersebut.

Kata Kunci: *modifikasi pati, pangan fungsional, tepung umbi-umbian, terigu*

ABSTRACT

This article aims to discuss the potential of flour and modified tuber starch as an alternative to wheat flour. The potential of tubers as a source of local Indonesian carbohydrates is very large which can be used as raw material for various food products to replace wheat, so as to reduce dependence on wheat consumption. In line with the era of society 5.0, innovation in the food sector is needed to improve the quality of tuber flour that can be utilized by the community. The characteristics of tuber flour are different from wheat flour so it is necessary to apply several methods to improve the functional properties of flour and tuber starch that can approach the character of wheat flour or what is desired according to consumer demand and what is needed by the industry. Modification methods that have been applied to the tubers can be done physically, biologically, chemically, or a combination of several methods.

Keywords: *modified starch, functional food, tubers flour, flour*

PENDAHULUAN

Data dari *Food and Agriculture Organization of Unites Nation* (FAO) pada tahun 2020 menobatkan Indonesia menjadi negara importir gandum nomor satu di dunia hingga mencapai 10,3 juta ton yang kemudian disusul oleh Turki, Mesir, Tiongkok, Italia, Aljazair, Brasil, Filipina, Bangladesh, dan Nigeria (Anonym a, 2022). Gandum diimpor dalam beragam bentuk mulai dari bulir gandum, hingga tepung (meslin). Data dari Badan Pusat Statistik (BPS) menyebutkan bahwa setidaknya pada tahun 2022 Indonesia sudah mengimpor sebanyak 31,34 ribu ton tepung gandum dari beberapa negara (Anonym b, 2022), di antaranya yang paling banyak bersumber dari negara Australia, kemudian Ukraina, Canada, Argentina, Amerika Serikat, serta beberapa negara lainnya (Anonym c, 2022). Tingginya jumlah impor terigu Indonesia disebabkan oleh peningkatan konsumsi produk pangan berbasis terigu seperti mi *instant*, kue kering, dan roti dengan pengguna terbesar berasal dari pelaku Usaha Kecil dan Menengah (60%); industri menengah dan besar (31,4%); dan distributor yang dialirkan kepada pasar retail (8,6%) (Helmi & Khasanah, 2021).

Sebagai upaya untuk mengurangi ketergantungan pada terigu, perlu dilakukan pemanfaatan sumber karbohidrat lokal dalam bentuk tepung dan pati. Di antara sumber karbohidrat yang ada di Indonesia dan diproduksi secara luas adalah umbi -umbian. Terdapat beragam jenis umbi yang dibudidayakan di Indonesia dan umum dikonsumsi serta diproses menjadi tepung dan pati. Beberapa jenis umbi tersebut diantaranya adalah singkong, ubi jalar (ungu, kuning, dan putih), talas, ganyong, garut, dan lain-lain.

Tepung dan pati dari umbi – umbian lokal merupakan produk antara yang dapat digunakan dan dimanfaatkan dalam aneka produk pangan. Beberapa di antaranya juga sudah digunakan sebagai bahan pendukung untuk memenuhi kebutuhan industri. Namun, karakteristik sifat fisikokimia tepung dan pati alami umbi – umbian lokal, jika dibandingkan dengan karakteristik terigu, memiliki sifat karakteristik yang berbeda seperti kemampuan daya kembang, kelarutan dalam air, kapasitas penyerapan air dan minyak, struktur permukaan,

serta beberapa sifat lainnya (Ariyanti, Budiyati, & Kumo, 2014). Perbedaan karakteristik sifat fisikokimia itulah yang mengakibatkan produk olahan pangan yang terbuat dari tepung atau pati alami umbi-umbian seperti hal nya pada roti, mie, dan produk lainnya menghasilkan karakteristik produk yang kurang diminati oleh konsumen, jika dibandingkan dengan produk pangan serupa yang berbahan baku terigu.

Untuk memaksimalkan pemanfaatan dan penggunaan tepung dan pati umbi-umbian lokal pada kebutuhan industri ataupun rumah tangga sebagai bahan baku atau bahan pembantu dalam produksi produk pangan olahan, perlu dilakukan perbaikan sifat dan karakteristik tepung dan pati umbi -umbian alami dengan cara modifikasi. Sebagai contoh, sifat -sifat alami pada tepung dan pati alami yang perlu diperbaiki yaitu kemampuan stabilitas panas yang buruk, ketahanan panas yang rendah, mudah mengalami retrogradasi, dan lain-lain (Zhou et al. (2016) dalam Ekafitri, 2018). Kondisi tersebut tentu akan berdampak pada karakteristik produk yang dihasilkan, sehingga perlu dilakukan perbaikan sifat dengan melakukan modifikasi tepung dan pati alami.

Modifikasi yang dilakukan pada tepung dan pati umbi mampu memperbaiki karakteristik sifat tepung dan pati alami, sebagai contoh jika dibandingkan tepung singkong termodifikasi dengan perlakuan fermentasi akan memiliki kemampuan rehidrasi, suhu gelatinisasi, serta tingkat viskositas yang lebih tinggi dibandingkan dengan tepung singkong alami (Yulifianti, Ginting, & Utomo, 2012). Modifikasi tepung dan pati sudah banyak dilakukan dengan tujuan memperbaiki sifat karakteristik tepung dan pati sesuai yang diinginkan dan dapat memperluas penggunaan tepung dan pati tersebut. Studi terdahulu menyebutkan terdapat berapa jenis metode modifikasi yang dapat dilakukan, di antaranya adalah modifikasi fisik (*heat-moisture treatment*, *annealing*, pre-gelatiniasai, iradiasi sinar gamma, perlakuan dengan *microwave*, *ultrasonic treatment*, *ultrahigh pressure treatment*) (Sui & Kong, 2018); modifikasi kimia (hidrolisis asam, oksidasi, *stabilization*, *cross-linking*) (Chen et al., 2018); dan modifikasi biologi (dengan fermentasi atau metode enzimatis).

PEMBAHASAN

1. Teknologi Modifikasi Fisik

Terdapat beberapa metode yang dapat diaplikasikan dalam modifikasi pati secara fisik, di antaranya ada yang menggunakan suhu tinggi (panas) dan ada pula yang tidak menggunakan perlakuan panas. Pada modifikasi yang menggunakan panas contoh perlakuannya adalah pre-gelatinisasi, *heat-moisture treatment*, *annealing*, dan pemanasan dengan *microwave*. Sedangkan metode modifikasi fisik yang tidak menggunakan panas contohnya adalah iradiasi gamma, *ultrahigh pressure treatment*, *ultrasonic treatment*, dan *milling*. Adapun penjelasan mengenai teknis metode modifikasi fisik yang banyak dilakukan, adalah sebagai berikut.

a. Heat Moisture Treatment (HMT)

Prinsip modifikasi tepung atau pati dengan metode *heat-moisture treatment* adalah dengan mengkondisikan tepung atau pati pada kelembaban rendah (<35% w/w) biasanya ditambahkan air yang kemudian diberi perlakuan suhu tinggi pada periode waktu tertentu. Suhu yang digunakan adalah di atas suhu transisi *glass* namun di bawah suhu gelatinisasi pati (Gunaratne, 2018). Perlakuan panas dapat dilakukan dengan menggunakan oven (Rahmawati, Wahyuni, & Khaeruni, 2019), *microwave*, ataupun *autoclave* (Dudu, Oyedeji, & Oyeyinka, 2019) dengan suhu optimum yang disesuaikan dengan jenis sumber pati alami yang digunakan.

Perlakuan *Heat-moisture treatment* dapat berdampak pada struktur pati dan sifat fisikokimianya. Lebih khusus disebutkan bahwa *Heat-moisture treatment* dapat mempengaruhi interaksi rantai pati dan mengganggu proses kritalisasi pati yang terjadi pada area amorf dan kristalin, yang berdampak pada perubahan suhu *pasting, gelling*, serta kecernaan tanpa merusak granula pati (Gunaratne, 2018). Perubahan yang terjadi pada sifat karakteristik pati setelah modifikasi, jika diaplikasikan dan digunakan dalam produk olahan pangan akan menghasilkan karakteristik produk yang berbeda pula.

b. *Annealing*

Metode modifikasi fisik lainnya yang juga menggunakan perlakuan suhu tinggi dengan kandungan air pada lama waktu tertentu adalah *Annealing.* Mirip dengan metode *Heat-moisture treatment* suhu perlakuan panas yang digunakan pada metode *annealing* adalah di bawah suhu gelatinisasi pati dan di atas suhu transisi *glass*. Metode ini aman digunakan dan dapat menekan biaya proses karena tidak menggunakan bahan kimia apapun.

Jika dicermati, metode *annealing* dan *Heat-moisture treatment* terlihat serupa, namun pada dasarnya memiliki perbedaan yaitu pada penggunaan jumlah kadar air yang digunakan. Pada metode *annealing* tepung atau pati yang akan dimodifikasi, dikondisikan kandungan airnya lebih dari 40% w/w (Gunaratne, 2018), sedangkan pada metode *Heat-moisture treatment* kandungan air tidak lebih dari 35% (w/w). Perbedaan kedua metode antara *Heat-moisture treatment* dan *Annealing* terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbedaan Kondisi Metode Modifikasi dengan *Annealing* dan *Heat Moisture Treatment*

Parameter	Annealing	Heat Moisture Treatment
Moisture level (w/w)	40 – 80%	<35%
Suhu (°C)	25 – 80°C	> 80°C
Lama waktu	Bisa lebih dari 24 jam	1 – 24 jam

Sumber: Gunaratne, 2018

Beberapa perubahan sifat karakteristik tepung dan pati setelah proses modifikasi dengan metode *annealing* adalah meningkatnya suhu gelatinisasi dan menghasilkan pati yang lebih tahan pada panas (Wahyuni et al., 2020).

2. Teknologi Modifikasi Biologi

Salah satu cara modifikasi tepung dan pati secara biologi yang paling banyak digunakan adalah fermentasi. Proses fermentasi pada modifikasi tepung dan pati dapat dilakukan

secara spontan ataupun dikondisikan menggunakan starter bakteri. Bakteri yang mendominasi dalam fermentasi tersebut adalah bakteri asam laktat (BAL) (Mariyani, 2011).

Aktivitas mikroba pada fermentasi akan menghasilkan enzim yang mampu memecah pektin dan selulosa sehingga menyebabkan rusaknya granula pati dan menyebabkan perubahan pada sifat karakteristik dari tepung dan pati yang sudah dimodifikasi. Proses fermentasi juga menghasilkan asam laktat yang dapat memberikan aroma dan cita rasa khas pada tepung dan pati yang dihasilkan (Yulifianti, Ginting, & Utomo, 2012).

Tahapan proses pembuatan tepung modifikasi dengan contoh penerapan pada tepung singkong dimulai dengan melakukan pengupasan singkong, kemudian pencucian dan pembersihan. Singkong yang sudah bersih, kemudian dilakukan penyawutan ataupun dapat juga dengan dilakukan pembuatan *chips*, setelah itu dilakukan fermentasi. Tahapan fermentasi dilakukan dengan merendam hasil *chips* singkong ataupun sawut singkong pada bak-bak rendaman air. Kemudian dilakukan inkubasi pada lama waktu tertentu. Setelah fermentasi selesai dan dihentikan, sawut atau *chips* kemudian ditiriskan, dicuci dengan air mengalir dan ditekan dengan alat *press* agar kadar airnya berkurang, kemudian dilanjutkan dengan pengeringan hingga proses penepungan (Yulifianti, 2012).

Lamanya proses fermentasi sawut singkong tergantung dengan kondisi fermentasi yang dilakukan. Fermentasi yang dilakukan dengan menggunakan starter secara umum, akan berlangsung selama 12 jam pada kondisi suhu kamar/ ruang. Namun, pada aplikasi fermentasi sawut singkong yang menggunakan starter-starter dengan asam laktat tertentu dapat mempercepat proses fermentasi hingga menjadi 8-10 jam (Yulifianti, Ginting, & Utomo, 2012). Setelah melalui tahapan proses fermentasi, sawut umbi kemudian ditiriskan dan dibilas dengan air, selanjutnya dilakukan pengepresan untuk membantu mengurangi kandungan air dan dilanjutkan dengan proses pengeringan (Yulifianti, Ginting, & Utomo, 2012; Windhaswari *&* *Putri,* 2014; Sukerti, Marsiti, Cok, & Adnyawati, 2013).

Penelitian terdahulu yang dilakukan pada tepung beras termodifikasi dengan metode fermentasi, didapati bahwa hasil tepung beras termodifikasi dengan fermentasi memiliki kekuatan

pembentukan gel yang lebih kuat, jika dibandingkan dengan tepung beras alaminya. Hal tersebut terjadi karena terdapat protein yang larut saat pembengkakan pati pada proses modifikasi; kemudian alasan lainnya adalah karena terjadinya peningkatan interaksi intermolekular antara molekul pati dan protein pada pati termodifikasi (Park *et al.,* 2020).

3. Teknologi Modifikasi Kimiawi

Sifat tepung dan pati secara kimiawi dipengaruhi oleh adanya sebagian besar gugus hidroksil pada polimer pati. Gugus hidroksil ini membuka peluang untuk dilakukannya modifikasi secara kimiawi, karena dengan adanya gugus fungsi baru akan memberikan sifat yang khusus dan spesifik pada pati modifikasi. Metode modifikasi secara kimia dapat dilakukan dengan hidrolisis asam, oksidasi, atau dengan esterifikasi, *cross-linking*, dan kombinasi. Adapun efektivitas dari modifikasi ini tergantung pada jenis reagen yang digunakan, sifat pati alaminya, serta ukuran dan struktur granula pati (Chen, Kaur, & Singh, 2018). Berikut beberapa penjelasan mengenai metode modifikasi pati secara kimia.

a. Cross-linking

Pada dasarnya yang disebut dengan ikatan silang atau *cross – lingking* adalah terbentuknya ikatan kimia baru pada rantai yang berbeda (Haq et al., 2019). Modifikasi dengan metode *cross-linking* ini melibatkan terjadinya pergantian pati intra dan interhidrogen yang menyebabkan terbentuknya ikatan antar rantai pati dengan ikatan kovalen yang lebih kuat, dan lebih permanen. Secara teknis, prinsip perlakuan modifikasi ini adalah dengan memberikan reagen pada tepung dan pati yang akan dimodifikasi. Beberapa reagen utama *food-grade* yang dapat digunakan dalam reaksi ini adalah *sodium trimetaphosphate* (STMP), *sodium tripolyphosphate* (STPP), *epichlorohydrin* (EPI), *phosphoryl chloride* ($POCl_3$), *monosodium phosphate* (SOP), dll (Chen et al., 2018; Haq et al., 2019).

Adapun, masing – masing reagen memiliki kondisi reaksi optimum yang berbeda dan akan menghasilkan karakteristik tepung dan pati modifikasi yang berbeda pula. Sebagai contoh kondisi optimum pada penggunaan reagen $POCl_3$ kondisi

larutan tepung atau pati pada tingkat keasaman pH 4, pada kondisi garam netral sedangkan reagen STMP akan bekerja lebih efisien pada kondisi suhu tinggi dengan kondisi pati semi kering; sedangkan jika pati pada kondisi terhidrasi maka dapat dikondisikan pada suhu hangat (Chen et al., 2018). Pada reaksinya, seiring dengan meningkatkan jumlah ikatan silang (*cross-linking*) yang terjadi pada rantai pati, akan membuat pati menjadi lebih tahan terhadap gelatinisasi (Chen et al., 2018).

b. Oksidasi

Penelitian-penelitian terdahulu sudah menunjukkan bahwa oksidasi pati mampu meningkatkan sifat karakteristik fisikokimia pati dan tepung. Sebagai contoh oksidasi pati gadung dapat meningkatkan nilai *baking expansion* dan kelarutan pati (Budiyanti et al., 2016). Oksidasi pati juga terbukti meningkatkan pembentukan lapisan film dan adhesivitas pada formulasi tertentu. Secara prinsip, modifikasi secara kimiawi dilakukan dengan tujuan untuk memotong ikatan antar molekul (1 – 4) glukosa, untuk mengganti gugus hidroksil ataupun menambah gugus fungsional lainnya ke dalam molekul pati. Dengan demikian kondisi ikatan molekul pati berubah, dan akan berdampak pada karakteristik pati dan tepung termodifikasi (Budiyanti et al., 2016).

Dampak dari proses oksidasi pada tepung dan pati, mampu memberikan dampak perubahan profil gelatiniasasi, dan peningkatan *baking expansion*. Selain itu juga memiliki viskositas yang rendah, kemampuan stabilitas pada suhu tinggi, retrogradasi rendah, sifat pembentukan film, hingga kejernihan yang lebih baik (Ekafitri, Pranoto, Herminiati, & Rahman, 2018). Perbaikan sifat karakteristik yang dapat ditimbulkan dari proses oksidasi tersebut dapat membuat hasil tepung dan pati modifikasi dengan aplikasi pemanfaatan yang lebih luas.

4. Karakteristik Tepung Modifikasi Pada Beberapa Umbi-Umbian Lokal

a. Singkong (*Manihot esculenta*)

Salah satu hasil pertanian jenis umbi–umbian yang paling banyak dimanfaatkan adalah singkong. Sebagian besar singkong diproduksi untuk diolah menjadi tepung singkong dan pati singkong atau yang biasa disebut tapioka. Baik tepung singkong

maupun tapioka banyak digunakan sebagai bahan baku ataupun bahan tambahan dalam formulasi produk pangan di industri (Siguenza-Andres et al., 2021) dengan rasio penggunaan sebanyak 10 – 100% dari formulasi untuk mensubtitusi terigu (Yulifianti, Ginting, & Utomo, 2012).

Meskipun tepung singkong ataupun tapioka sudah banyak digunakan dalam industri pangan, namun penggunaannya terkadang masih mengalami kendala dalam beberapa produk pangan. Hal tersebut karena kelemahan yang dimiliki oleh tepung singkong, di antaranya adalah rendahnya kemampuan mengembang pada produk *bakery* yang dibuat menggunakan campuran tepung singkong dalam jumlah besar pada formulasinya; selain itu kelemahan lainnya adalah tekstur produk *bakery* yang dihasilkan cenderung keras; dan adanya aroma apek singkong pada produk hasil yang kurang dikehendaki konsumen (Yulifianti, Ginting, & Utomo, 2012) serta warna tepung yang putih cenderung kecoklatan (Mariyani, 2011).

Untuk memperbaiki kelemahan dan memperluas pemanfaatan tepung singkong dan pati singkong (tapioka) saat ini sudah banyak usaha dilakukan dengan melakukan aneka modifikasi baik secara kimia, fisik, maupun biologi yang mampu menghasilkan tepung singkong dan tapioka dengan sifat karakteristik yang dikehendaki. Beberapa hasil modifikasi tepung singkong dan pati singkong yang sudah dikembangkan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Dampak Modifikasi Tepung Singkong pada Aplikasi Produk Pangan

Metode Modifikasi	Kondisi Modifikasi	Produk Aplikasi	Hasil Penelitian	Sumber Referensi
Modifikasi Fisik				
Autoclaving-cooling berulang	- Pemanasan *suspense* 70-85°; - *Autoclaving* 121°C; 41 menit - Pendinginan suhu ruang; 4 – 5 jam - Pendinginan, 4°C; 12 – 16 jam	Tepung bumbu ayam *crispy*	■ Formulasi tepung bumbu optimum yang memiliki nilai optimasi 77,4% yaitu terdiri dari 41% tepung singkong modifikasi ACC; 31% tepung sagu; dan 16% tepung maizena. ■ Memiliki kerenyahan yang lebih dibandingkan formula lainnya.	Sutrisno, Rahman, & Maulana (2017)
Heat Moisture Treatment	- Pendinginan; 4°C; 24 jam - Pemanasan dalam *autoclave;* 121°C; 15 menit	Tepung singkong modifikasi	■ Memiliki derajat putih 86,689 ■ Meningkatkan suhu awal *pasting* ■ Menurunkan viskositas (puncak, *breakdown,* akhir, *setback*) ■ Berdasarkan kurva RVA, hasil tepung modifikasi ini memungkinkan digunakan sebagai bahan baku mi non terigu.	Pasca, Muhandri, Hunaefi, & Nurtama (2021)
Modifikasi Biologi				
Fermentasi	Spontan	Mie kering	Formula mie kering yang memiliki karakteristik mendekati mie kering dari terigu 100% adalah 40% mocaf dan 60% terigu.	Mariyani (2011)

Metode Modifikasi	Kondisi Modifikasi	Produk Aplikasi	Hasil Penelitian	Sumber Referensi
Fermentasi	Spontan; 20 – 25°C; 36 jam	Tepung singkong modifikasi	■ Terjadi peningkatan kadar amilosa yaitu 33,27% ■ Memiliki derajat putih yang setara dengan tepung singkong alami ■ Meningkatkan suhu awal pasting ■ Berdasarkan kurva RVA, hasil tepung modifikasi ini memungkinkan digunakan sebagai bahan baku mi non terigu.	Pasca, Muhandri, Hunaefi, & Nurtama (2021)
Fermentasi	- BAL (Bakteri asam laktat) (1:9 (v/v) dengan media fermentasi) - 48 jam	Tepung singkong modifikasi	■ Penurunan suhu gelatinisasi menjadi 62°C	Edam (2017)
Fermentasi	- Perendaman air garam, 6 jam - Perendaman dengan larutan ragi tape, 3 hari (penggantian air setiap 24 jam)	*Sourdough*	■ Kemampuan peningkatan volume *sourdough* 0,47 cm. ■ Pengembangan volume *sourdough* dengan campuran mocaf berpusat ditengah adonan, belum merata.	Maretna, Rohaya, & Zaidiyah (2022)
Fermentasi	- Starter BIMO-CF (5gr:5l air) - Perendaman 18 jam	Tepung mocaf	■ Tepung mocaf dari 4 varietas ubi kayu (Manggu, UJ-5, Mentega, Perelek) memenuhi SNI 7622:2011 tepung mocaf	Lestari (2017)

Berdasarkan Tabel 2 menunjukkan bahwa perlakuan modifikasi pada tepung singkong baik secara fisik maupun biologi (fermentasi) mampu memberikan perubahan karakteristik pada tepung singkong modifikasi dibandingkan dengan karakteristik tepung singkong alaminya; dan berdampak pada karakteristik aplikasi produk olahan yang dihasilkan.

Sebagai contoh pada perlakuan *Heat Moisture Treatment (HMT)* akan menyebabkan perubahan molekuler pada pati yang dapat mengendalikan mobilitas molekuler pati, dan mempengaruhi interaksi antar ikatan rantainya. Hal tersebut berdampak pada perubahan sifat fisikokimia, struktur, hingga kemampuan rheologi dan termal pada pati modifikasi (Dudu,Oyedeji, Oyeyinka, & Ma*,* 2019).

Penelitian yang dilakukan oleh Dudu, Oyedeji, Oyeyinka, & Ma (2019) menunjukkan modifikasi tepung singkong dan pati singkong dengan metode *Dry heat moisture treatment* mampu meningkatkan kemampuan *swelling power* dan *pasting properties* yang berdampak pada kemampuan peningkatan volume produk roti. Tidak hanya itu, dampak dari perlakukan HMT pada tepung singkong dan pati singkong, baik yang menggunakan metode *Dry-heat moisture treatment* atau *Steam-heat moisture treatment*; keduanya mampu memperbaiki struktur adonan roti yang dihasilkan dan mengurangi terjadinya staling pada produk roti.

Adapun pada proses modifikasi tepung singkong dengan cara biologi (fermentasi) dapat mengubah struktur pati yang semula kristalin menjadi lebih *amorf* akibat adanya aktivitas bakteri asam laktat (Pasca, Muhandri, Hunaefi, & Nurtama, 2021). Yulifianti, Ginting, & Utomo (2012) menjelaskan bahwa pada saat fermentasi terjadi hidrolisis parsial pada pati yang menyebabkan derajat polimerisasi amilosa dan amilopektin menjadi lebih kecil. Akibatnya terjadi penurunan viskositas intrinsik pati, yang berdampak pada perubahan karakteristik sifat pati termodifikasi. Perubahan tersebut yaitu meningkatnya kemampuan mengembang pada adonan roti yang dibuat dari pati terfermentasi saat dilakukan pemanasan atau pemanggangan dalam proses pembuatan roti. Diinformasikan juga bahwa proses fermentasi pati dengan menggunakan starter inokulasi *L. plantarum* 1 – 3% menghasilkan karakteristik

pengembangan adonan pada pembuatan roti yang lebih baik dibandingkan dengan fermentasi pati yang dilakukan secara spontan (Yulifianti, Ginting, & Utomo, 2012) .

b. Ubi Jalar (Ipomoea batatas L.*)*

Selain singkong, salah satu jenis umbi yang dibudidayakan dan banyak dikonsumsi sehari – hari adalah ubi jalar. Komoditas ubi jalar juga banyak digunakan dalam pembuatan tepung. Hal ini karena kandungan karbohidratnya yang tinggi, produktivitas hasil panennya tinggi, dan dapat diolah menjadi aneka produk yang sangat beragam (Widhaswari & Putri, 2014).

Selain itu, ubi jalar juga memiliki beragam varietas seperti ubi jalar ungu, ubi jalar putih, dan ubi jalar kuning. Masing – masing jenis ubi jalar tersebut memiliki sifat dan keunggulan masing – masing. Kandungan utama ubi jalar adalah pati, sebesar 80% dari berat kering (Zhu & Wang, 2014). Pati ubi jalar banyak dimanfaatkan di industri, sebagai bahan pendukung pada produk pangan atau farmasi. Adapun pati yang digunakan adalah pati alami maupun pati yang sudah dimodifikasi (Zhu & Wang, 2014).

Karakteristik tepung ubi jalar alami memiliki kelemahan, contohnya pada tepung ubi jalar ungu alami yang stabilitas patinya kurang kokoh, serta tidak tahan terhadap suhu tinggi sehingga membuatnya cenderung lebih cepat lembek. Oleh karena itu, untuk mengubah karakteristik tepung menjadi lebih baik sesuai yang diharapkan dan dapat dimanfaatkan secara lebih luas perlu dilakukan modifikasi (Widhaswari & Putri, 2014). Proses modifikasi tepung ubi jalar dijelaskan pada Tabel 3.

Tabel 3. Proses dan Aplikasi Tepung Ubi Termodifikasi dengan Metode Fisik, Biologi, dan Kimia

Metode Modifikasi	Kondisi Modifikasi	Produk Aplikasi	Hasil Penelitian	Sumber Referensi
Modifikasi Fisik				
Hydrothermal treatment dengan *Microwave (MWT)*	Rasio air dan tepung (10:1); suhu 25; 50; 100; dan 150°C selama 15 menit	Tepung ubi jalar termodifikasi	■ MWT mampu meningkatkan kadar *Resistant starch* yang dihasillkan ■ Suhu gelatinisasi meningkat, seiring dengan meningkatkan suhu *microwave*. ■ MWT meningkatkan kemampuan ekstraksi senyawa *phenolic* pada tepung.	(Cui, Yeon Yoo, & Zhu, 2022)
Heat Moisture Treatment	Kadar air tepung ubi jalar (±30%); (50°C); (5jam) Dan (60°C); 5 jam	Mie *instant*	■ Sifat fungsional *swelling power* dan kelarutan masih di bawah sifat fungsional terigu ■ Semakin tinggi suhu modifikasi, dan semakin lama waktu modifikasi dapat meningkatkan *swelling power* dan kelarutan tepung umbi.	(Santosa, Handayani, Bastian, & Kusuma, 2015)
Ultrasonic treatment	*Ultrasonic bath* (40kHz) 40 menit; di bawah air 3 cm (32°C)	Adonan roti kukus	■ Adonan roti (50% terigu, 50% pasta ubi) mengalami peningkatan mutu setelah perlakuan sonikasi pada adonan terfermentasi. ■ Terjadi perbaikan warna pada adonan roti setelah sonikasi.	(Zhang *et al.*, 2022)

Metode Modifikasi	Kondisi Modifikasi	Produk Aplikasi	Hasil Penelitian	Sumber Referensi
Modifikasi Kimia				
Crosslinking	STPP (Sodium tripolyphospat) 0.5%; 1 jam	Tepung ubi jalar termodifikasi	■ Kenaikan kadar pati ■ Kenaikan kadar abu ■ Penurunan kadar amilosa ■ Penurunan warna kemerahan	Windhaswari *et al.*, 2014)
Modifikasi Biologi				
Fermentasi	Fermentasi tepung singkong (75 jam; 50°C); Tepung ubi jalar (perendaman pada asam sitrat (3g/l), 5 menit;	Tepung mix (singkong, ubi jalar, dan sorgum) termodifikasi	■ Tekstur roti yang dihasilkan dipengaruhi oleh rasio tepung singkong terfermentasi, ubi jalar, dan sorgum. ■ Penambahan tepung singkong terfermentasi >70% meningkatkan kemampuan pengembangan (swelling)	(Monthe *et al.*, 2019)
Fermentasi	Fermentasi spontan; perendaman (12 – 36 jam)	Tepung ubi jalar terfermentasi	■ Kadar pati menurun seiring lama waktu fermentasi ■ Kemampuan viskositas tepung meningkat	(Anggraeni dan Yuwono., 2014)

Salah satu metode modifikasi fisik yang digunakan pada modifikasi tepung ubi jalar adalah *hydrothermal treatment* dengan alat pemanas menggunakan *microwave* (MWT). *Microwave* dipilih karena memiliki gelombang elektromagnetik yang mampu memberikan panas yang seragam pada seluruh bagian sampel dan memiliki kecepatan panas yang lebih cepat dibandingkan dengan pemanasan konvensional (Cui, Yeon Yoo, & Zhu, 2022). Dampak dari modifikasi tepung ubi jalar

yang dilakukan oleh Cui, Yeon Yoo, & Zhu (2022) didapati bahwa tepung ubi jalar termodifikasi mengalami peningkatan kadar pati resisten, peningkatan suhu gelatinisasi, dan meningkatkan kemampuan ekstraksi senyawa fenolik yang mampu mengatasi terjadinya masalah perubahan warna.

Adapun pada tepung ubi terfermentasi, hasil studi yang dilakukan oleh Aggraeni dan Yuwono (2014) menunjukkan bahwa semakin lama waktu fermentasi dilakukan, akan meningkatkan viskositas tepung ubi jalar. Hal ini karena terjadinya pembengkakan granula pati selama proses fermentasi. Pembengkakan granula pati ini memudahkan terjadinya gelatinisasi.

Dalam penelitian lainnya, telah dilakukan perbaikan produk roti kukus dengan menggunakan bahan baku adonan roti berupa campuran 50% terigu dan 50% pasta ubi jalar, hasilnya mutu roti kukus mengalami peningkatan mutu setelah dilakukan modifikasi pati dengan metode *ultrasound treatment* (Zhang et al., 2022). Hasil modifikasi pada pati yang digunakan sebagai bahan baku pada roti kukus tersebut, membuat adonan roti memiliki sifat rheologi yang lebih baik, kemudian struktur molekul yang terbentuk pada adonan roti menjadi lebih kompak, dan terdapat perbaikan pada warna roti yang dihasilkan (Zhang et al., 2022). Hal ini dimungkinkan terjadi karena *ultrasonic treatment* membuat adonan menjadi lebih seragam, dan meningkatkan jaringan dari struktur gluten pada adonan yang memicu menghasilkan mutu roti kukus yang baik.

c. *Talas (Colocasia esculentum* (L) *Schott)*

Talas merupakan salah satu jenis umbi yang mudah dibudidayakan dan banyak digunakan sebagai bahan baku pangan tradisional. Selain itu talas juga digunakan sebagai sumber karbohidrat. Sudah banyak dilakukan penelitian yang bertujuan untuk memodifikasi pati pada tepung talas dengan tujuan agar sifat karakteristik tepung talas mendekati terigu.

Salah satunya adalah modifikasi tepung atau pati talas yang dilakukan oleh Ariyanti et al. (2014) dan Ekafitri *et al.* (2018). Modifikasi yang dilakukan adalah dengan metode oksidasi pada tepung talas, dalam hal ini menggunakan jenis talas Bogor dengan metode oksidasi menggunakan larutan H_2O_2 atau disebut hydrogen peroksida sebagai larutan oksidator dalam kondisi asam. Hidrogen peroksida sudah banyak digunakan

sebagai oksidator karena sifatnya yang tidak menyisakan residu berbahaya bagi tubuh (Ariyanti, Budiyatno, & Kumoro, 2014, Ekafitri et al., 2018).

Hasil dari penelitian yang dilakukan oleh Ariyanti, Budiyatno, dan Kumoro (2014) tersebut, didapati bahwa tepung talas bogor yang sudah dilakukan modifikasi dengan metode oksidasi menggunakan oksidator H_2O_2 mampu meningkatkan kemampuan daya kembang (*swelling power*) dan meningkatkan kelarutan dalam air. Nilai daya kembang (*swelling power*) tepung talas termodifikasi ini masuk ke dalam rasio kemampuan daya kembang tepung terigu (Ariyanti, Budiyati, & Kumoro, 2014). Hal ini didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Ekafitri, et al. (2018) yang melakukan modifikasi tepung talas bogor dan dikombinasikan dengan iradiasi sinar UV, berhasil mengubah sifat fisiko kimia dan *baking expansion* tepung talas. Selain itu modifikasi tersebut mampu meningkatkan kandungan gugus karboksil, menurunkan kecerahan warna, meningkatkan *swelling power*, meningkatkan profil gelatinisasi seperti *peak visocity, final viscosity, breakdown viscosity,* dan menurunkan *setback viscousity*, *peak time* dan *peak temperature* dibandingkan dengan tepung talas alaminya.

Karakteristik tepung talas hasil modifikasi dengan metode oksidasi yang memiliki *peak viscocity* yang tinggi dan kecenderungan retrogradasi yang rendah, baik diaplikasikan sebagai *thickener agent* pada saus ataupun pada pembuatan sup kental. Selain itu dengan kemampuan *baking expansionnya* yang meningkat, dapat pula diaplikasikan pada produk bakery. Namun, hasil modifikasi tepung/pati juga memiliki kelemahan, penelitian yang dilakukan oleh c (2014) menyebutkan bahwa dengan penggunaan oksidator H_2O_2 atau hydrogen peroksida pada proses modifikasi pati atau tepung secara kimiawi yang dalam hal ini diaplikasikan pada produk kue kering, dapat meninggalkan *after taste* berupa rasa pahit yang muncul saat dikonsumsi. Tentu hal ini, dapat berdampak pada penerimaan konsumen, sehingga perlu dilakukan pengembangan dan perbaikan lebih lanjut.

Adapun modifikasi lainnya juga dilakukan dengan metode proses *precooked* (pemasakan) pada umbi talas sebelum dilakukan pengeringan dan penepungan. Perlakuan ini mampu memperbaiki sifat tepung talas yang dihasilkan hingga dapat

menggantikan *gum* komersil yang diaplikasikan pada produk *sorbets* sebagai *stabilizer* (Hong, & Nip, 1990). Aplikasi modifikasi tepung dan pati talas juga telah dilakukan dengan aneka metode lainnya seperti metode pre-gelatinisasi, *microwave treatment*, *autoclaving-cooling*, *annealing*, asetilasi, enzimatis, hingga kombinasi (Nagar et al., 2021) yang mampu menghasilkan tepung dan pati talas dengan sifat karakteristik yang lebih baik.

d. Uwi-uwian (Discorea spp.)

Uwi dengan nama latin *Discorea spp.* memiliki setidaknya ada 600 jenis, dengan lebih 50 jenis yang sudah dibudidayakan secara global. Uwi juga digunakan sebagai bahan pangan pokok di negara Afrika, Asia Timur, Amerika Selatan, Asean, dan India. Uwi dapat digunakan sebagai sumber pati dalam pemanfaatan industri (Falade & Ayetigbo, 2015).

Modifikasi pati pada uwi–uwian dilakukan untuk meningkatkan kemampuan viskositas, stabilitas, ukuran partikel, tekstur, kelarutan, kenampakan, kemampuan emulsifikasi, dan lain-lain (Falade & Ayetigbo, 2015). Beberapa atribut fisik dan sifat fungsional pada pati uwi - uwian dipengaruhi secara signifikan oleh jenis uwi yang berbeda dan proses modifikasi yang digunakan. Di antara hasil modifikasi yang sudah dilakukan oleh peneliti terdahulu pada uwi–uwian adalah mampu menurunkan ukuran granula pati, dan mengubah bentuk granulanya (Falade & Ayetigbo, 2015). Beberapa hasil studi lainnya yang sudah dilakukan pada uwi dengan metode modifikasi berbeda dijabarkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Modifikasi Tepung dan Pati Umbi *Discorea Spp.*

Tipe Modifikasi	Jenis Uwi (Discorea spp.)	Hasil Penemuan	Referensi
Electron beam irradiated (14.97 kGy)	*Dioscorea opposita* Thunb.	▪ Terjadi penurunan area kristalin pada pati ▪ Peningkatan kelarutan ▪ Penurunan kemampuan *pasting* dan *swelling* ▪ Terjadi perubahan warna tepung uwi setelah perlakuan modifikasi	(Wang et al., 2022)
Heat Moisture Treatment	*Dioscorea alata*	▪ Terjadi peningkatan kandungan pati resisten ▪ Meningkatkan area kristalin pada pati ▪ Tepung uwi ungu modifikasi ini dapat digunakan sebagai sumber prebiotik karbohidrat.	*(Asranudin* et al., *2021)*

Tipe Modifikasi	Jenis Uwi (Discorea spp.)	Hasil Penemuan	Referensi
Fermentasi	*Dioscorea alata*	▪ Memiliki *water absorption capacity* (WAC) dan *oil absorption capacity* (OAC) lebih tinggi dari terigu ▪ Lama waktu fermentasi terbaik adalah 36 jam	(Ulyarti et al., 2021)

KESIMPULAN

Tepung dan pati modifikasi saat ini telah dikembangkan secara pesat dari segi keilmuan dan penelitian. Berdasarkan hal-hal tersebut didapati bahwa beberapa jenis tepung umbi -umbian dengan perlakuan modifikasi tertentu memiliki sifat dan karakteristik yang mendekati karakteristik terigu, sehingga memiliki potensi besar dan mampu menjadi alternatif pengganti tepung terigu. Terdapat beberapa metode modifikasi tepung dan pati yang dapat digunakan yaitu secara fisik, kimiawi, dan biologi. Hasil modifikasi yang dilakukan pada tepung dan pati beragam, tergantung pada karakteristik bahan baku umbi yang digunakan dan jenis produk olahan pangan yang diaplikasikan. Sehingga perlu penyesuaian dalam melakukan modifikasi untuk dapat menghasilkan tepung termodifikasi dengan sifat karakteristik yang diharapkan konsumen. Hasil penerapan metode modifikasi tepung atau pati tersebut mampu memperbaiki beberapa sifat fungsionalnya, yaitu mampu memperbaiki kemampuan mengembang dan warna dari produk roti; mampu meningkatkan mutu pati sebagai *thickening agent* dan beragam manfaat lainnya. Namun begitu, masih perlu optimalisasi dalam proses modifikasi agar semakin mendekati sifat dan karakteristik terigu. Sehingga sebagai alternatif pemanfaatannya agar dapat tetap menghasilkan produk yang bermutu dan dikehendaki konsumen,

adalah dengan menjadikan tepung atau pati termodifikasi sebagai bahan campuran atau subtitusi terigu pada produk – produk pangan. Dengan demikian, tepung umbi – umbi lokal memiliki potensi pemanfaatan sebagai sumber karbohidrat pengganti terigu.

DAFTAR PUSTAKA

Anggraeni, Y.P., dan Yuwono, S.S. (2013). Pengaruh fermentasi alami pada chips ubi jalar (Ipomoea batatas terhadap sifat fisik tepung ubi jalar terfermentasi. *Jurnal pangan dan agroindustry*, 2 (2), 59 – 69.

Anonym a. (2022). Indonesia jadi negara importir gandum terbesar di Dunia pada 2020. Retrieved from https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2022/04/12/indonesia-jadi-negara-importir-gandum-terbesar-di-dunia-pada-2020.

Anonym b. (2022). Indonesia impor tepung gandum 31 ribu ton pada 2021. Retrieved from https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2022/03/01/indonesia-impor-tepung-gandum-31-ribu-ton-pada-2021.

Anonym c. (2022). Daftar negara asal impor gandum Indonesia, mana saja?. Retrieved from https://dataindonesia.id/sektor-riil/detail/daftar-negara-asal-impor-gandum-indonesia-mana-saja.

Ariyanti, D., Budiyati, C. S., & Kumoro, A. C. (2014). Modifikasi tepung umbi talas bogor (colocasia esculentum (L) schott) dengan teknik oksidasi sebagai bahan pangan pengganti tepung Reaktor, 15(1), 1-9. https://doi.org/10.14710/reaktor.15.1.1-9 .

Asranudin, Holilah, Syarifin, A. N. K., Purnomo, A. S., Ansharullah, & Fudholi, A. (2021). The effect of heat moisture treatment on crystallinity and physicochemical-digestibility properties of purple yam flour. *Food Hydrocolloids*, *120*. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106889.

Budiyanti, C. S., Kumoro, A. C., Ratnawati., Retnowati, D. S. (2016.) Modifikasi pati sukun (Artocarpus altilis) dengan teknik oksidasi menggunakan hydrogen peroksida tanpa katalis. *Teknik*, 37(1), 33.

Chen, Y.-F., Kaur, L., & Singh, J. (2018). Chemical modification of starch. In *Starch in Food*, 283-321. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100868-3.00007-x.

Cui, R., Yeon Yoo, M. J., & Zhu, F. (2022). Comparison of microwave and conventional heating on physicochemical properties and phenolic profiles of purple sweetpotato and wheat flours. *Food Bioscience*, *46*,. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101602.

Dudu, O.E., Li, L., Oyedeji, A.B., Oyeyinka, S.A., & Ma, Y. (2019). Structural and functional characteristics of optimised dry-heat-moisture treated cassava flour and starch. *International Journal of Biological Macromolecules,* 133, 1219 – 1227.

Dudu, O.E., Li, L., Oyedeji, A.B., Oyeyinka, S.A., & Ma, Y. (2019). Impact of steam-heat-moisture treatment on structural and functional properties of cassava flour and starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126, 1056-1064.

Edam, M. (2017). Aplikasi bakteri asam laktat untuk memodifikasi tepung singkong secara fermentasi. *Jurnal Penelitian Teknologi Industri* , 9(1), 1 – 8.

Ekafitri, R., Pranoto, Y., Herminiati, A., & Rahman, T. (2018). Tepung talas Bogor termodifikasi hasil oksidasi menggunakan hydrogen peroksida dengan dan tanpa iradiasi sinar UV. *Jurnal Riset Teknologi Industri, 12(2)*, 86-198. https://doi.org/10.26578/jrti.v12i2.3804

Falade, K., & Ayetigbo, O. (2015). Effects of annealing, acid hydrolysis and citric acid modifications on physical and functional properties of starches from four yam (Dioscorea spp.) cultivars. *Food Hydrocolloids*, *43*, 529-539. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.07.008

Gunaratne, A. (2018). *Physical modifications of starch*. Singapore, Springer Nature Singapore.

Haq, F., Yu, H., Wang, L., Teng, L., Haroon, M., Khan, R. U., Mehmood, S., Bilal Ul, A., Ullah, R. S., Khan, A., & Nazir, A. (2019). Advances in chemical modifications of starches and their applications. *Carbohydr Res*, *476*, 12-35. https://doi.org/10.1016/j.carres.2019.02.007

Helmi, R. L., & Khasanan, Y. (2021). *Mocaf: Optimalisasi proses dan poteinsi pengembangan industri berbasis UMKM*. Indonesia: LIPI Press.

Hong, G.P., & Nip. W.K. (1990). *Functional properties of precooked taro flour in sorbets. Food chemistry,* 36,261 – 270.

Lancetti, R., Salvucci, E., Moiraghi, M., Perez, G.T., Sciarini, L.S. (2022). Gl;uten-free flour fermemted with autochthonous starter for sourdough production: effect of the fermentastion process. Food Biosciemce, 47. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101723

Lestari, S. (2017). Kajian pengolahan tepung mocaf pada empat varietas ubi kayu menggunakan starter BIMO-CF dan lama perendaman 18 jam. Prosiding Seminar Nasional Agroinovasi Spesifik Lokasi untuk Ketahanan Pangan Pada Era Masyarakat Ekonomi ASEAN. Retrieved from http://repository.pertanian.go.id/handle/123456789/7202 pada 14/7/22; pukul 0:34.

Maretna, FW. L.D., Rohaya, S., & Zaidiyah. (2022). Aplikasi mocaf (modified cassava flour) menggunakan ragi tape dan ragi tempe pada pembuatan sourdough. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, 7(2). https://doi.org/10.17969/jimfp.v7i2.19688

Mariyani, N. (2011). Studi pembuatan mie kering berbahan baku tepung singkong dan mocaf (Modified Cassava Flour). *Jurnal Sains Terapan,* 1 (1), 30 – 41.

Monthe, O. C., Grosmaire, L., Nguimbou, R. M., Dahdouh, L., Ricci, J., Tran, T., & Ndjouenkeu, R. (2019). Rheological and textural properties of gluten-free doughs and breads based on fermented cassava, sweet potato and sorghum mixed flours. *Lwt*, *101*, 575-582. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.051

Nagar, C. K., Dash, S. K., Rayaguru, K., Pal, U. S., & Nedunchezhiyan, M. (2021). Isolation, characterization, modification and uses of taro starch: A review. *Int J Biol Macromol*, *192*, 574-589. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.041

Park, J., Sung, J. M., Choi, Y-S., Park, J-D. (2020). Effect of natural fermentation on milled rice grains: physicochemical and functional properties of rice flour. *Food Hydrocolloids,* 108. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106005

Pasca, B.D., Muhandri, T., Hunaefi, D., Nurtama, B. (2021). Karakteristik fisikokimia tepung singkong dengan beberapa metode modifikasi. *Jurnal Mutu Pangan*, 8(2). https://doi.org/10.29244/jmpi.2021.8.2.97.

Rahmawati, S., Wahyuni, S., Khaeruni, A. (2019). Pengaruh modifikasi terhadap karakteristik kimia tepung sagu termodifikasi: studi kepustakaan. *Jurnal Sains dan Teknologi Pangan,* 4(2). http://dx.doi.org/10.33772/jstp.v4i2.7129

Santosa, H., Handayani, N. A., Bastian, H. A., & Kusuma, I. M. (2015). Modifikasi tepung ubi jalar ungu (Ipomoea batatas L. poir) dengan metode heat moisture treatment (HMT) sebagai bahan baku pembuatan mie instan. *Metana,* 11(1). https://doi.org/10.14710/metana.v11i01.12580.

Sui, Z., & Kong, X. (2018). Physical modifications of starch. Singapore: Springer Nature Singapore.

Sukerti, N.W., Marsiti, Cok. I.R., & Adnyawati, N.D.M.S. (2013). Pengaruh modifikasi tiga varietas tepung ubi jalar dan terigu terhadap kualitas dan daya terima mie kering. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 2 (2), 231-237.

Sutrisno, E.T., Rahman, T., Maulana, C. (2017). Optimalisasi formula tepyng bumbu ayam goreng crispy berbahan baku tepung singkong (Manihot esculenta Crantz) modifikasi autoclaving – cooling cycle. Institutional repositories dan scientific journals: Universitas Pasundan.

Siguenza-Andres, T., Gallego, C., & Gomez, M. (2021). Can cassava improve the quality of gluten free breads?. LWT – *Food science and Technology*,149. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111923

Ulyarti,U. Yulia, A., Nazarudin, N., Armando, YG., & Erawaty L., (2021). Functional Properties of Purple Water Yam Flour Modified by Lactobacillus plantarum. *Makara Journal of Science*, 25(1), 1-7. https://doi.org/ 10.7454/mss.v25i1.1169

Wahyuni, S., Sarinah, Khaeruni, A., Dewi, N.D.P., Asnani, Tanaka, I., & Rahayu, M. (2020). Modification of wikau maombo flour from sweet cassava (Manihot utillisima) and bitter cassava (Manihot esculenta Crantz) with annealing method. *International Conference on Agriculture, Environment and Food Security*. doi 10.1088/1755-1315/782/3/032071

Wang, G., Wang, D., Qing, C., Chen, L., Gao, P., & Huang, M. (2022). Impacts of electron-beam-irradiation on microstructure and physical properties of yam (Dioscorea opposita Thunb.) flour. *Lwt*, *163*. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113531

Windhaswari, V.A., & Putri, W.D.R. (2014). Pengaruh modifikasi kimia dengan STTP terhadap karakteristik tepung ubi jalar ungu. *Jurnal Pangan dan Agroindustri,* 2(3), 121 – 128.

Yulifianti, R., Ginting, E., Utomo, J.S. (2012). Tepung kasava modifikasi sebagai bahan subtitusi terigu mendukung diversifikasi pangan. Buletin Palawija, 23, 1 – 12. http://dx.doi.org/10.21082/bulpa.v0n23.2012.p1-12

Zhang, M., Suo, W., Deng, Y., Jiang, L., Qi, M., Liu, Y., Li, L., Wang, C., Zheng, H., & Li, H. (2022). Effect of ultrasound-assisted dough fermentation on the quality of dough and steamed bread with 50% sweet potato pulp. *Ultrason Sonochem*, *82*, 105912. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105912

Zhu, F., Wang, S. (2014). Physicochemical properties, molecular structure, and uses of sweetpotato starch. *Trends in Food Science and Technology*, 36, 68 – 78. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.01.008

INOVASI PENGOLAHAN TALAS BENENG UNTUK MENDUKUNG KEBERAGAMAN KONSUMSI PANGAN MASYARAKAT 5.0

INNOVATION ON BENENG YAM PROCESSING TO SUPPORT THE DIVERSITY OF FOOD CONSUMPTION OF SOCIETY'S 5.0

Ariyanti Hartari

Program Studi Teknologi Pangan, Jurusan Pertanian, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

ariyanti@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Talas beneng dengan umbi yang besar dan berwarna kuning merupakan komoditas talas lokal khas dari Gunung Karang, Provinsi Banten. Talas beneng yang umumnya tumbuh liar dapat dibudidayakan pada sistem agroforestri dan merupakan komoditas spesifik lokasi yang berpotensi sebagai bahan pangan lokal substitusi beras dan tepung terigu. Komoditas ini sangat potensial sebagai komoditas lokal untuk memenuhi kebutuhan pangan yang cukup dan terjangkau bagi seluruh masyarakat. Karakteristik talas ini yaitu memiliki senyawa kristal kalsium oksalat pada seluruh bagian tanaman mulai dari daun, tangkai daun, umbi hingga akar yang menyebabkan iritasi pada mulut dan tenggorokan dan menimbulkan rasa gatal ketika umbi talas beneng dikonsumsi/dikunyah dan bersifat antinutrisi bagi tubuh manusia. Pengolahan pascapanen talas beneng yang tepat untuk menurunkan kadar oksalat yang dikandung secara alami dapat menghasilkan pati dan tepung talas beneng yang tidak menimbulkan rasa gatal. Penurunan kadar oksalat dilakukan melalui perendaman menggunakan air, larutan garam, asam sitrat, asam klorida. Karbohidrat merupakan komponen yang dominan di talas beneng dan potensial untuk diolah menjadi tepung atau pati. Pengolahan tepung dan pati talas beneng

menjadi berbagai produk olahan pangan seperti cookies, mi basah, brownies, makaroni, yogurt, nata menjadikan talas beneng potensial sebagai produk pensubstitusi tepung terigu. Budidaya talas beneng yang intensif disertai dengan promosi lokasi dan pemberian informasi budidaya talas beneng akan memudahkan masyarakat dan industri dalam memperoleh bahan baku talas beneng. Pemasaran talas beneng, pati dan tepung talas beneng maupun produk olahan berbasis pati dan talas beneng melalui e-commerce akan mengenalkan dan memasyarakatkan talas beneng.

Kata kunci : *oksalat, pati, talas beneng, tepung*

ABSTRACT

Taro beneng with large yellow tubers is a local taro commodity typical of Gunung Karang, Banten Province. Taro beneng which generally grows wild can be cultivated in agroforestry systems and is a location-specific commodity that has the potential as a local food ingredient to substitute rice and wheat flour. This commodity is very potential as a local commodity to meet the needs of sufficient and affordable food for the whole community. Calcium oxalate crystalline compounds are found in all parts of the taro beng plant, from leaves, petioles, tubers to roots, causing irritation to the mouth and throat and causing itching when the taro beng is consumed/chewed and has anti-nutritive properties for the human body. Proper post-harvest processing of taro beng to reduce levels of oxalate contained naturally can produce starch and taro beng flour that does not cause itching. The reduction of oxalate levels was carried out through immersion using water, salt solution, citric acid, and hydrochloric acid. Carbohydrates are the dominant component in taro beneng and have the potential to be processed into flour or starch. The processing of taro beng flour and starch into various processed food products such as cookies, noodles, brownies, macaroni, yogurt, nata makes taro beneng a potential product as a substitute for wheat flour. Intensive cultivation of beneng yam accompanied by promotion of locations and providing information on the cultivation of taro beneng will make it easier for the community and industry to obtain raw materials for taro

beneng. Marketing of taro beneng, starch and taro beneng flour as well as processed products based on starch and taro beneng through e-commerce will introduce and popularize taro beneng.

Keywords : *oxalate, starch, taro beneng, flour*

PENDAHULUAN

Pangan merupakan kebutuhan dasar manusia yang harus tersedia dalam jumlah yang cukup secara kuantitas dan kualitas serta beragam dalam rangka memenuhi kebutuhan sumber energi untuk melakukan segala aktivitas hidup, baik dari pangan sumber karbohidrat, protein, dan lemak. Dalam era Society 5.0 pangan tidak hanya sebatas memenuhi kebutuhan energi namun lebih lanjut dapat memberikan nilai-nilai fungsional bagi kesehatan di masyarakat. Pemenuhan kebutuhan pangan yang cukup dan terjangkau bagi seluruh masyarakat dalam rangka mencapai tujuan kedua dari tujuh belas tujuan SDG's yaitu mengakhiri kelaparan, mencapai ketahanan pangan dan nutrisi yang lebih baik dan mendukung pertanian berkelanjutan. Konsumsi pangan merupakan salah satu indikator keberhasilan program ketahanan pangan. Konsumsi pangan yang dinyatakan dalam bentuk skor Pola Pangan Harapan (PPH) atau *Desirable Dietary Pattern* (DDP) mencerminkan akses masyarakat terhadap pangan, status gizi dan kesejahteraannya. Beras merupakan pangan sumber karbohidrat yang dominan dikonsumsi penduduk Indonesia dan menjadi pemasok utama sumber energi untuk menjalankan aktivitas sehari-hari. Beras menjadi pangan sumber karbohidrat utama yang konsumsinya hampir mencapai 100%, yang berarti hampir seluruh rumah tangga di Indonesia mengkonsumsi beras (Wijayati, Harianto, & Suryana, 2019).

Setiap era pemerintahan di Indonesia konsisten memiliki komitmen untuk menjaga ketersediaan beras dalam negeri karena peranannya yang begitu penting. Walaupun secara nasional, konsumsi beras/kapita pada periode 2008 hingga 2017 mengalami penurunan sedangkan konsumsi/kapita komoditas pangan berbasis terigu mengalami peningkatan. Komoditas turunan terigu yang mengalami tren peningkatan konsumsi oleh masyarakat Indonesia adalah roti. Peningkatan konsumsi roti ini terjadi khususnya pada kurun waktu 2014 – 2017 yaitu pada tahun 2014 sebanyak 3,23 bungkus kecil/tahun menjadi 19,12 bungkus kecil/tahun pada 2017. Peningkatan konsumsi roti yang tajam ini bukan merupakan tren yang baik mengingat bahan baku roti adalah tepung terigu yang berbasis impor. Apabila pangan

yang lebih diminati masyarakat adalah pangan yang berbasis bahan baku impor, seperti tepung terigu, maka kondisi ini akan mengakibatkan peningkatan kerentanan terhadap kerawanan pangan.

Kementerian Perdagangan mengupayakan peningkatan konsumsi pangan lokal non beras dengan terjadinya tren penurunan konsumsi beras (Kementerian Perdagangan, 2013). Upaya peningkatan konsumsi pangan lokal non beras ini diharapkan mampu mengurangi ancaman kerawanan pangan dan mampu membangun kemandirian pangan bagi masyarakat Indonesia karena pangan pokoknya disesuaikan dengan potensi dan kearifan lokal. Pangan lokal non beras yang lazim dikonsumsi dan potensial sebagai pangan sumber karbohidrat atau pangan pokok dapat berasal dari kelompok umbi-umbian seperti ubi kayu, ubi jalar; dan kelompok serealia seperti jagung, sorgum, gandum.

Umbi-umbian banyak memberikan peran dalam ketahanan pangan masyarakat di dunia (Bantacut, 2010). Umbi-umbian merupakan komoditas yang berpotensi sebagai pangan alternatif selain beras. Kondisi ini didukung dengan ketahanan komoditas umbi-umbian yang budidayanya mampu bertahan di bawah naungan. Demikian pula dengan talas beneng yang mampu tumbuh di bawah naungan dan merupakan salah satu suksesi ekologi bagi hutan karena keberadannya yang menjadi sumber pakan bagi beberapa jenis burung di hutan (Kerbs, 2015).

Tahun 2008 masyarakat Banten menemukan komoditas talas beneng. Kata Beneng berasal dari kata **besar** dan **koneng** yang menunjukkan ciri fisik dari umbi talas yang berukuran jauh lebih besar dari talas lainnya dan berwarna kuning. Umbi talas beneng muncul hingga ke atas permukaan tanah menyesuaikan dengan tinggi tanaman talas beneng. Karena pertumbuhan umbi hingga ke atas permukaan tanah tersebut, jika umbi talas beneng belum dipanen hingga melampaui umur panennya maka umbi talas beneng tidak akan bermasalah. Hal ini yang membedakannya dengan talas Bogor. Umbi talas beneng yang telah dipanen mampu bertahan dan tidak berubah citarasanya hingga 4 bulan setelah pemanenan. Namun umur panen optimal talas beneng yang memberikan citarasa nikmat ketika sudah berumur 6-8 bulan (Supriyadi, 2022).

Tujuan dari penulisan artikel ini adalah memaparkan potensi talas beneng sebagai pangan lokal yang dapat diolah menjadi berbagai produk pangan melalui inovasi berkelanjutan untuk mendukung ketahanan pangan.

PEMBAHASAN

Talas beneng yang memiliki nama ilmiah *Xanthosoma undipes* K.Koch, pada awalnya merupakan tanaman liar yang belum dibudidayakan, belum dimanfaatkan dan belum dianggap bernilai ekonomis. Talas beneng yang merupakan talas lokal khas dari Gunung Karang, Provinsi Banten, termasuk dalam genus Xanthosoma dengan klasifikasi sebagai berikut :

Kingdom : Plantae
Subkingdon : Tracheobionta
Super Divisi : Spermatophyta
Divisi : Magnoliophyta
Kelas : Liliopsida
Sub Kelas : Arecidae
Ordo : Arales
Famili : Araceae
Genus : *Xanthosoma*
Species : *Xanthosoma undipes*
(Pancasasti, 2016).

Talas beneng dapat tumbuh di dataran rendah hingga ketinggian 2.700 m dpl, memerlukan tanah yang subur di daerah lembab dengan rentang suhu 21 – 27°C dan curah hujan cukup pada kisaran 175 – 250 cm/tahun. Talas beneng tidak tahan terhadap lingkungan dengan suhu yang sangat rendah (beku). Talas beneng ini jarang berbunga, namun talas beneng ditemui dapat berbunga di lokasi-lokasi dengan iklim yang sesuai seperti di Kepulauan Solomon, Papua New Guinea, dan Indonesia. Kemampuan berkecambah yang rendah dan pertumbuhannya yang lambat menjadikan rendahnya peluang biji talas beneng mampu tumbuh menjadi tanaman dewasa.

Saat ini talas beneng telah dibudidayakan petani, diolah, dan berkontribusi pada pendapatan petani, masyarakat dan pemerintah daerah Kabupaten Pandeglang. Kondisi ini terlihat

pada peningkatan luas tanam talas beneng dan luas panen talas beneng di Kabupaten Pandeglang tahun 2021 sebesar 68,4% dan 72,0% dibandingkan dengan tahun sebelumnya (Ramadhan, Aminah, Wardana, Subekti, & Putra, 2022). Talas beneng juga telah ditetapkan sebagai Varietas Unggul Nasional asal Kabupaten Pandeglang Provinsi Banten berdasarkan SK Mentan No. 981.KH.540/C/10/2020 tanggal 12 Oktober 2020 tentang Pelepasan Calon Varietas Talas Beneng sebagai varietas unggul dengan nama Beneng (Besar dan Koneng). Penetapan ini menjadi langkah awal untuk mendukung pengembangan talas beneng sebagai komoditas unggulan dan bernilai strategis bagi provinsi Banten.

Hasil penelitian Suhaendah, Fauziyah, Sudomo, & Suhartono (2021) menunjukkan talas beneng potensial untuk dibudidayakan dan dikembangkan secara agroforestri. Hal ini terlihat pada perbedaan yang signifikan pada parameter tinggi talas, panjang daun, dan lebar daun talas beneng yang ditumbuhkan secara agroforestri dibandingkan secara monokultur. Talas beneng yang ditumbuhkan secara agroforestri memiliki tinggi tanaman, panjang daun dan lebar daun yang lebih tinggi atau lebih lebar daripada talas beneng yang dibudidayakan secara monokultur. Kondisi ini menunjukkan bahwa talas beneng mampu tumbuh dengan baik di bawah tegakan dan sesuai dengan Kerbs (2015) yang menyatakan bahwa talas beneng merupakan jenis talas yang dapat tumbuh baik di tepi hutan maupun hutan primer. Adanya peluang budidaya talas beneng secara agroforestri ini diharapkan dapat meningkatkan kesejahteraan petani, terutama yang berada di sekitar hutan (Suryani & Dariah, 2012).

Talas beneng yang merupakan komoditas spesifik lokasi yang berpotensi sebagai bahan pangan lokal substitusi beras dan tepung terigu. Tanaman talas beneng yang berumur 2 tahun mampu menghasilkan umbi yang beratnya dapat mencapai 2 kg. Pengolahan umbi talas beneng yang paling banyak dilakukan yaitu dikukus dan digoreng. Pengolahan umbi talas beneng menjadi bentuk tepung dan pati merupakan potensi yang sangat layak untuk diupayakan. Beberapa kendala yang dihadapi petani dan masyarakat yang berupaya mengolah umbi talas beneng menjadi tepung atau pati antara lain warna tepung/pati talas beneng yang kecoklatan, memiliki aroma dan rasa yang kurang baik, serta kadar oksalat yang tinggi. Oksalat yang memiliki

rumus kimia $C_2O_4^{2-}$ ada yang larut air (dalam bentuk asam oksalat) dan larut tidak larut air (yang berikatan dengan ion kalsium dalam bentuk kalsium oksalat) (Kurdi, 2002). Senyawa kristal kalsium oksalat terdapat di seluruh bagian tanaman talas beneng mulai dari daun, tangkai daun, umbi hingga akar. Keberadaan senyawa kalsium oksalat pada talas beneng ini dapat menyebabkan iritasi pada mulut dan tenggorokan dan menimbulkan rasa gatal ketika umbi talas beneng dikonsumsi/ dikunyah dan bersifat antinutrisi bagi tubuh manusia.

Hasil uji kadar oksalat umbi talas beneng yang dilakukan oleh Muttakin, Muharfiza, & Lestari (2015) menunjukkan kadar oksalat pada umbi talas beneng yang tumbuh liar lebih tinggi daripada umbi talas beneng yang dibudidaya. Irisan umbi talas beneng setebal 2 mm yang direndam dalam NaCl 10% selama 120 menit mampu menurunkan kadar oksalat hingga 1600 ppm. Penurunan kadar oksalat pada irisan talas beneng ini disebabkan terjadinya pengikatan asam oksalat oleh garam. Proses pencucian dan pengirisan juga berkontribusi terhadap penurunan kadar oksalat pada talas beneng. Upaya menurunkan kadar oksalat juga dilakukan pada jenis talas lain seperti talas Bogor dengan menggunakan larutan asam sitrat, asam klorida dan garam, dengan perendaman dalam NaCl 10% selama 60 menit mampu mereduksi 93,62% kadar oksalat (Mayasari, 2002). Perendaman talas beneng dalam air hangat bersuhu 40°C selama 4 jam mampu mereduksi 81,96% kadar oksalat pada talas beneng (Wahyudi, 2010). Hal ini menunjukkan peningkatan suhu dari larutan perendam mampu meningkatkan kelarutan asam oksalat sehingga terlepas dari jaringan yang mengikatnya. Penurunan atau reduksi kadar oksalat ini menjadi penting karena oksalat pada bahan pangan mampu mengendapkan kalsium dan membentuk kalsium oksalat yang tidak dapat diserap tubuh dan menjadi penyebab penyakit batu ginjal (Syarif, Rinnai, & Fahmi, 2007).

Pengolahan berbagai jenis umbi dan serealia menjadi bentuk tepung dan pati merupakan bentuk olahan yang memungkinkan pemanfaatan berbagai jenis umbi dan serealia tersebut menjadi berbagai produk pangan yang variatif. Demikian pula dengan talas beneng. Berdasarkan hasil penelitian Apriani, Setyadjit, & Arpah (2011), komposisi nutrisi umbi talas beneng yang terdiri atas karbohidrat 84,88%, protein 6,29%, pati 75,62%,

lemak 1,12% sangat potensial untuk diolah menjadi tepung atau pati sehingga dapat diolah lebih lanjut menjadi berbagai macam produk makanan. Pengolahan umbi talas beneng menjadi tepung diawali dengan pengupasan, pencucian, dan pengirisan. Untuk menurunkan kadar oksalat pada umbi talas beneng, irisan umbi talas beneng direndam dalam air atau larutan garam, atau larutan asam sitrat atau larutan asam klorida, dilanjutkan dengan pencucian atau pembilasan. Pengirisan mampu meningkatkan luas permukaan talas beneng, kemudian perendaman dan pembilasan diharapkan dapat menurunkan kadar oksalat pada talas beneng. Irisan umbi talas beneng selanjutnya dikeringkan pada suhu 50-60°C atau dikeringkan di bawah sinar matahari hingga kadar air 12%. Untuk memperoleh irisan talas beneng kering yang merata, dilakukan proses pembalikan. Pengeringan pada suhu yang tidak terlalu tinggi ini juga untuk mencegah terjadinya *case hardening* dan meminimalkan perubahan warna pada irisan talas beneng. Irisan talas beneng yang telah kering selanjutnya dilakukan penggilingan dan pengayakan agar diperoleh tepung talas beneng dengan tingkat kehalusan yang seragam.

Hampir serupa dengan pengolahan tepung talas beneng, pengolahan talas beneng menjadi pati diawali dengan pengupasan dan pencucian umbi talas beneng. Umbi talas beneng yang telah bersih selanjutnya diiris pada ketebalan yang sama untuk meningkatkan luas permukaan talas beneng. Perendaman irisan umbi talas beneng dalam larutan garam atau larutan asam sitrat atau larutan asam klorida bertujuan untuk menurunkan kadar oksalat, dan diikuti dengan pencucian. Tahap selanjutnya adalah penghancuran atau pengecilan ukuran irisan talas beneng menjadi bentuk bubur atau pasta. Bubur atau pasta talas beneng tersebut selanjutnya dilakukan penyaringan untuk memisahkan fraksi pati dari fraksi selain pati. Filtrat yang diperoleh selanjutnya diendapkan selama kurang lebih 24 jam, dan air yang berada di bagian atas endapan filtrat dibuang. Endapan bubur talas beneng selanjutnya dikeringkan pada suhu $\pm$ 50°C hingga dicapai kadar air 12%. Pati talas beneng yang telah dikeringkan umumnya berbentuk granula-granula berukuran cukup besar. Agar diperoleh pati dengan tingkat kehalusan yang seragam, dilakukan proses penggilingan dan pengayakan.

Hasil penelitian Rostianti, Hakiki, Ariska, & Sumantri (2018) mampu menghasilkan tepung talas beneng dengan kadar air 9% - 14% dengan rendemen rata-rata 20% - 30%. Rendemen tepung talas beneng ini dipengaruhi oleh tekstur talas beneng yang keras sehingga banyak partikel besar hasil penggilingan yang tidak lolos saat penyaringan dan menurunkan nilai rendemen yang diperoleh. Warna dari tepung talas beneng yang diperoleh pada penelitian ini memiliki derajat putih sebesar 81,15±0,00%. Nilai ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan standar tepung ubi kayu dengan derajat putih berkisar pada 77,28±0,4%. Kemampuan tepung talas beneng membentuk gel merupakan karakteristik penting yang menentukan aplikasi tepung talas beneng untuk diolah sebagai bahan baku berbagai produk olahan pangan. Tepung talas beneng memiliki suhu awal gelatinisasi cukup tinggi yaitu pada suhu 83,5°C. Suhu awal gelatinisasi tepung talas beneng yang cukup tinggi ini dikarenakan kadar protein pada umbi talas beneng yang cukup tinggi yang menghambat pengeluaran amilosa dari granula pati. Tepung talas beneng memiliki karakteristik tidak stabil terhadap pemanasan karena penurunan viskositasnya cukup tinggi selama pemanasan. Selain itu, pasta dari tepung talas beneng cenderung mudah mengalami retrogradasi bila dilihat dari tingginya nilai *setback* pada hasil pengukuran amilografnya (Rostianti, Hakiki, Ariska, & Sumantri, 2018).

Perlakuan *pre-cooked* pada pembuatan tepung atau ekstraksi pati dari komoditas umbi-umbian umumnya dilakukan untuk meningkatkan daya cerna, meningkatkan sifat fungional, penampakan dan warna atau aroma dari tepung atau pati yang dihasilkan. Penelitian Bintanah, Hagnyonowati, & Jauharany (2021) yang memberikan perlakuan *pre-cooked* berupa pengovenan dan kombinasi pengukusan-pengovenan pada umbi talas beneng yang dijadikan bentuk tepung memberikan profil kandungan zat gizi yang berbeda. Profil kandungan gizi tepung talas beneng yang diberikan perlakuan *pre-cooked* pengovenan dan kombinasi pengukusan – pengovenan ditampilkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Kandungan Gizi Tepung Talas Beneng dengan Perlakuan *Pre-Cooked*

Kandungan Gizi	Perlakuan *pre-cooked*	
	Pengukusan + Pengovenan	Pengovenan
Kadar air (%)	10,20	9,89
Protein (%)	7,88	9,29
Lemak (%)	0,85	0,80
Karbohidrat (%)	26,70	26,56
Serat (%)	13,65	14,30
Pati (%)	16,02	18,03
Amilosa (%)	0,50	0,70
Amilum (%)	15,52	17,33

Sumber : Bintanah et al., 2021

Kombinasi pengukusan dan pengovenan sebagai perlakuan *pre-cooked* meningkatkan kadar air, kadar lemak, dan kadar karbohidrat tepung talas beneng, serta menurunkan kadar protein, serat, pati, amilos, dan amilum tepung talas beneng dibandingkan dengan perlakuan *pre-cooked* pengovenan. Kondisi ini disebabkan pada perlakuan pengukusan, terjadi penyerapan air oleh granula pati pada umbi talas beneng yang mengakibatkan peningkatan kadar air tepung talas beneng. Kombinasi pengukusan dan pengovenan juga mengakibatkan terjadinya denaturasi protein, gelatinisasi pati dan pemecahan molekul pati dan amilum menjadi komponen yang lebih sederhana (monosakarida atau disakarida). Kadar lemak pada tepung talas beneng yang mendapatkan perlakuan *pre-cooked* pengukusan + pengovenan memberikan keuntungan yaitu menurunkan kecenderungan retrogradasi pada pati tepung talas beneng. Penurunan peluang retrogradasi ini disebabkan oleh terabsorbsinya lemak pada permukaan granula pati sehingga membentuk lapisan hidrofobik disekitar granula. Tepung talas beneng dengan perlakuan *pre-cooked* pengovenan menghasilkan tepung dengan karakteristik kadar

protein dan serat lebih tinggi serta kadar karbohidrat dan lemak lebih rendah. Karakteristik ini sesuai apabila diolah menjadi produk pangan untuk penderita diabetes mellitus.

Kusumasari, Eris, Mulyati, & Pamela (2019) melakukan analisis karakteristik tepung talas beneng yang diproduksi oleh Gabungan Kelompok Tani (Gapoktan) Juhut, Kabupaten Pandeglang. Tahapan pembuatan tepung talas beneng yang dilakukan Gapoktan Juhut (Gambar 1) dilakukan secara sederhana dengan memanfaatkan sinar matahari pada proses pengeringan.

Sumber: Kusumasari, Eris, Mulyati, & Pamela, 2019

Gambar 1. Proses Pembuatan Tepung Talas Beneng di Gapoktan Juhut

Karakteristik tepung talas beneng yang dihasilkan Gapoktan Juhut memiliki ukuran partikel yang kasar, sehingga diperlukan tahapan penggilingan dan pengayakan pada ukuran

100 mesh untuk meningkatkan derajat kelarutan tepung dalam air, *Polydispersity Index* (PDI), dan distribusi ukuran partikelnya. Karakteristik kimia tepung talas beneng produksi Gapoktan Juhut ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Kimia Tepung Talas Beneng Produksi Gapoktan Juhut

Parameter	Kadar	Parameter	Kadar
Kadar air (%)	9,04	Kadar amilopektin (%)	37,02
Kadar abu (%)	2,25	Kadar gula total (%)	0,94
Kadar lemak (%)	0,17	Kadar karoten (ppm)	0,08
Kadar karbohidrat	81,81	Derajat putih (%)	68,56
Kadar pati (%)	56,29	Nilai L	91,13
Kadar protein (%)	6,73	Nilai a	2,75
Kadar amilosa (%)	19,27	Nilai b	11,27

Sumber: Kusumasari, Eris, Mulyati, & Pamela , 2019

Ditinjau dari kadar airnya, tepung talas beneng produksi Gapoktan Juhut sesuai SNI (maksimal 14,5%), sedangkan kadar abunya masih diatas batas aman tepung menurut SNI yaitu 0,7% (SNI 3751:2009). Kadar abu yang tinggi pada tepung talas beneng akan menurunkan kualitasnya, terutama dalam hal kekuatan adonan, warna dan aktivitas fermentasi. Ditinjau dari kadar protein yang cukup tinggi (6,73%), kadar amilopektin yang lebih tinggi daripada amilosanya, dan kadar lemak yang rendah (0,17%), tepung talas beneng produksi Gapoktan Juhut potensial dijadikan sebagai tepung subtitusi terigu terutama untuk bahan baku produk biskuit, cracker, atau produk ekstrudat.

Kadar protein yang cukup tinggi dan kadar lemak yang rendah, menjadikan tepung talas beneng potensial dijadikan sebagai tepung pensubstitusi terigu. Pemanfaatan tepung talas beneng sebagai penstubstitusi terigu telah diteliti pada berbagai produk pangan seperti *brownies*, mi, nata, *cookies*, makaroni, yoghurt, dan baksi ikan. Haliza, Kailaku, & Yuliani (2012) menggunakan desain *mixture simplex lattice* dari *Response Surface Methodology* (RSM) untuk mendapatkan formulasi optimal tepung talas beneng yang dikombinasikan dengan pati

jagung pada produk brownies. Parameter yang digunakan untuk optimasi adalah kekerasan (*hardness*), kekenyalan (*springiness*), kelengketan (*adhesiveness*), kepaduan (*cohesiveness*), *gumminess*, *chewiness*, total serat pangan (*total dietary fiber*), dan uji kesukaan terhadap warna, rasa, aroma, tekstur, dan keseluruhan produk *brownies*. Hasil optimasi dengan nilai *desirability* tertinggi mendapatkan proporsi tepung talas beneng dan pati jagung (maizena) sebesar 86% : 14%. Komposisi gizi/ nutrisi *brownies* hasil formula optimal ditampilkan pada Tabel 3. berikut.

Tabel 3. Komposisi Gizi/Nutrisi Brownies Formula Terpilih

Nutrisi / komponen kimia	Jumlah
Air (%)	15,21
Karbohidrat (%)	50,31
Lemak (%)	28,64
Protein (%)	4,67
Abu (%)	1,17
Serat pangan (%)	9,54
~ Serat pangan larut air (%)	2,14
~ Serat pangan tidak larut air (%)	7,41
Energi (kkal/100 g)	476,00

Sumber : Haliza et al., 2012

Berdasarkan komposisi gizi *brownies* formula terpilih tersebut, setiap 100 gram *brownies* tepung talas beneng mengandung 476 kkal. Untuk kebutuhan energi 2000 kkal, takaran saji *brownies* talas beneng sebesar 10% dari total kebutuhan energi harian (200 kkal) karena *brownies* termasuk kategori makanan selingan. Pada ukuran takaran saji 200 kkal, *brownies* talas beneng berkontribusi serat pangan sebesar 16,05%.

Tepung talas beneng dapat dimanfaatkan sebagai pensubstitusi terigu pada pembuatan mi basah dari proporsi 5% hingga 30% (Lestari & Susilawati, 2015). Semakin tinggi proporsi penggunaan tepung talas beneng akan menghasilkan mi basah dengan warna yang semakin gelap dan penurunan tingkat kesukaan panelis terhadap tekstur mi basah. Semakin tinggi

proporsi penggunaan tepung talas beneng juga menghasilkan mi basah yang karakternya semakin kering. Hal ini dikarenakan peningkatan proporsi tepung talas beneng akan menurunkan kadar gluten pada adonan mi basah dan menurunkan elastisitas adonan ketika akan dibentuk (di*sheeting*). Peningkatan proporsi tepung talas beneng juga menurunkan kesukaan panelis terhadap tekstur mi basah. Peningkatan proporsi tepung talas beneng tidak mempengaruhi penilaian panelis terhadap aroma mi basah. Hal ini disebabkan pada semua formula digunakan air daun suji sehingga menghilangkan aroma dari tepung talas beneng.

Pemanfaatan tepung talas beneng yang dikombinasikan dengan tepung daun kelor (3%) dan diaplikasikan pada pembuatan *cookies* mampu menghasilkan *cookies* dengan karakteristik sensori yang paling disukai panelis. Cookies yang dihasilkan memiliki karakteristik kadar air 4,36%, protein 2,04%, lemak 27,66%, karbohidrat 62,75%, abu 3,21%, serat kasar 2,75%, serat pangan 14,9%, dan kalori 497,5 kkal/100 g (Yuniarsih, Adawiyah, & Syamsir, 2019). Kadar serat pangan yang tinggi pada tepung komposit talas beneng dan daun kelor ini merupakan keunggulan tepung komposit yang dapat diaplikasikan pada produk-produk pangan dengan klaim tinggi serat. Tepung komposit talas beneng dan daun kelor memiliki stabilitas yang rendah terhadap panas, sehingga aplikasinya lebih sesuai untuk produk-produk pangan dingin atau beku (Yuniarsih et al., 2019).

Selain *cookies,* komposit tepung talas beneng dan tepung daun kelor juga diolah menjadi produk makaroni seperti yang dilakukan Maulani dan Mulyana (2019). Parameter karakteristik kimia dari makaroni komposit tepung talas benen dan tepung daun kelor yaitu kadar air berkisar antara 7,91% hingga 11,75%, kadar abu berkisar antara 1,68% hingga 1,85%, kadar lemak berkisar antara 0,75% - 2,90%, kadar protein berkisar pada 21,60% - 24,12%, dan kadar karbohidrat berkisar antara 59,30% hingga 67,53%. Kadar air makaroni dari komposit tepung talas beneng dan tepung daun kelor sesuai dengan standar SNI untuk produk pasta makaroni yaitu maksimal 12,5%, sehingga aman untuk mencegah pertumbuhan kapang. Kadar abu makaroni dari tepung komposit talas beneng dan tepung daun kelor masih diatas batas aman SNI yaitu maksimal 1%. Kadar protein makaroni dari komposit tepung talas beneng dan tepung daun kelor sesuai

dengan standar SNI yaitu minimal 10%. Kadar protein yang cukup tinggi ini merupakan keunggulan dari makaroni komposit tepung talas beneng dan tepung daun kelor. Peningkatan proporsi tepung daun kelor meningkatkan kesukaan panelis terhadap atribut warna dan tekstur makaroni, namun menurunkan kesukaan panelis terhadap atribut rasa dan aroma makaroni.

Tepung talas beneng yang kaya akan kandungan karbohidrat juga potensial sebagai subtrat yang dikombinasikan dengan susu pada pengolahan yoghurt. Penggunaan tepung talas beneng sebesar 1% tidak memberikan perubahan flavor pada yoghurt (Kusumasari & Pamela, 2019). Variasi starter bakteri asam laktat dan penggunaan tepung talas beneng tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik sensori dari yoghurt yang dihasilkan. Kombinasi starter *Lactobacillus bulgaricus + Lactobacillus achidophillus + Streptococcus thermophillus* merupakan kombinasi terbaik dalam menghasilkan yoghurt pada penelitian Kusumasari dan Pamela (2019).

Kandungan karbohidrat yang tinggi pada umbi talas beneng, menjadikannya potensial untuk diolah menjadi pati. Modifikasi pati talas beneng dapat dilakukan untuk memperbaiki karakteristik fisiko kimianya sehingga aplikasinya menjadi lebih luas. Asetilasi merupakan salah satu metode modifikasi pati untuk meningkatkan karakteristik fisiko kimia pati. Asetilasi pati dapat menggunakan asam asetat, asam asetat anhidrida, atau vinil asetat. Semakin tinggi rasio asam yang digunakan akan meningkatkan persertase asetilasi dan meningkatkan Derajat Substitusi (DS). Asetilasi pati talas beneng menggunakan asetat anhidrida pada konsentrasi 5, 10, dan 20 g/50 g pati (basis kering) yang dilakukan Wibisana et al. (2022) menghasilkan pati termodifikasi dengan %Asetil berkisar pada 2,15 – 8,6 dan DS berkisar antara 0,08 – 0,32. Peningkatan rasio asetat anhidrida secara umum meningkatkan *swelling power* dari pati termodifikasi dibandingkan pati alami. Peningkatan rasio asetat anhidrida pada 20 g/50 g pati justru menurunkan *swelling power* pati termodifikasi dibandingkan *swelling power* pada rasio 5 g/50 g pati dan 10 g/50 g pati. Peningkatan rasio asetat anhidrida meningkatkan kelarutan pati termodifikasi dibandingkan pati alami.

Pengolahan talas beneng menjadi pati menghasilkan produk samping berupa air sisa rendaman pati. Air sisa rendaman pati talas beneng ini dimanfaatkan oleh Hakiki, Rostianti, Nasir, & Nursuciyoni (2019) sebagai media pertumbuhan nata. Pembuatan nata dari air sisa rendaman pati talas beneng ini memerlukan waktu 13 hari. Waktu ini serupa dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Putriana dan Siti (2013). Secara visual, nata talas beneng tidak menunjukkan perbedaan dengan nata de coco. Rendemen dari nata talas beneng ini berkisar antara 12,74% hingga 30,98%. Peningkatan rendemen nata talas beneng berbanding lurus dengan konsentrasi *A. xylinum* yang digunakan. Penggunaan *A. xylinum* pada konsentrasi 10% menunjukkan rendemen yang berbeda dengan konsentrasi 20% dan 25%. Namun penggunaan konsentrasi *A. xylinum* pada konsentrasi 20% dan 25% tidak memberikan hasil yang berbeda. Konsentrasi *A. xylinum* tidak memberikan perbedaan terhadap parameter kekerasan nata talas beneng. Parameter kekerasan ini berhubungan erat dengan kapasitas pengikatan air dari lapisan selulosa yang dihasilkan oleh *A. xylinum*. Peningkatan konsentrasi *A. xylinum* pada 10%, 15% dan 20% menunjukkan respon serat kasar yang berbeda nyata, namun konsentrasi 20% dan 25% tidak menunjukkan respon serat kasar yang berbeda nyata. Dari aspek organoleptik, penggunaan konsentrasi *A. xylinum* pada konsentrasi 25% menunjukkan tingkat kesukaan yang paling disukai panelis dalam hal warna, favour, tekstur, dan rasa nata talas beneng.

Berdasarkan uraian diatas, umbi talas beneng merupakan komoditas bahan baku pangan potensial yang mampu menghasilkan produk pangan berkualitas baik dengan citarasa yang enak, bernilai gizi tinggi dan memiliki sifat fungsional bagi tubuh. Kadar serat pangan yang tinggi merupakan nilai tambah dari produk olahan talas beneng dengan klaim pangan kaya/tinggi serat. Pengolahan pasca panen yang tepat mampu menurunkan kadar oksalat pada pati dan tepung talas beneng sehingga tidak menimbulkan rasa gatal saat dikonsumsi dan produk olahannya dapat diterima secara organoleptik/sensori konsumen.

Informasi lokasi budidaya umbi talas beneng perlu dibangun dan disebarluaskan untuk memberikan informasi ketersediaan bahan baku. Jaringan informasi lokasi budidaya ini

juga perlu ditunjang dengan kemudahan untuk menghubungi narahubung sehingga masyarakat dan industri pengolah memperoleh informasi yang dibutuhkan dengan mudah dan cepat. Budidaya talas beneng yang dilakukan semakin masif merupakan cikal bakal ketahanan pangan berbasis komoditas lokal.

Promosi dan pemasaran produk pangan berbasis tepung dan pati talas beneng melalui *e-commerce* perlu dibangun dan disosialisasikan secara intensif untuk memperkenalkan talas beneng sebagai pangan potensial masa depan yang mendukung ketahanan dan keberlanjutan pasokan pangan non beras. Pengemasan dan promosi yang menarik dari produk pangan olahan berbasis talas beneng akan meningkatkan animo masyarakat dan generasi muda untuk mencoba dan mengkonsumsi. Kelengkapan informasi gizi dan kelebihan produk pangan olahan berbasis talas beneng juga merupakan nilai jual/ aspek komersial yang perlu ditonjolkan/diunggulkan.

KESIMPULAN

Pemanfaatan talas beneng dalam bentuk tepung dan pati menjadi beragam produk pangan olahan menunjukkan potensinya untuk dibudidayakan lebih intensif dan terstruktur sehingga dapat tersedia data sebaran budidaya dan kuantitas panen dari waktu ke waktu. Hal ini sangat penting dalam mendukung keberlanjutan dan ketersediaan umbi talas beneng dalam bentuk segar maupun sebagai bahan baku tepung dan pati talas beneng. Komersialisasi dan promosi berbagai produk pangan olahan berbasis talas beneng juga menjadi penting untuk memasyarakatkan dan mensosialiasikan potensi talas beneng sebagai sumber karbohidrat non beras. Komersialisasi produk pangan olahan berbasis talas beneng dengan memanfaatkan berbagai saluran pemasaran digital sangat diperlukan agar talas beneng disukai semua generasi. Dukungan dan kerjasama berbagai pihak baik masyarakat, akademisi, pemerintah dan industri serta berbagai rantai pemasaran sangat dibutuhkan untuk memasyarakatkan talas beneng sebagai umbi potensial seperti halnya ubi jalar dan singkong.

DAFTAR PUSTAKA

Apriani, R. N., Setyadjit, & Arpah, A. (2011). Karakterisasi Empat Jenis Umbi Talas Varian Mentega, Hijau, Semir, dan Beneng Serta Tepung yang Menghasilkan dari Keempat Varian Umbi Talas. *Jurnal Penelitian Ilmu Pangan*, *1*(1).

Bantacut, T. (2010). Ketahanan pangan berbasis cassava. *Jurnal Pangan*, *19*(1), 3–13.

Bintanah, S., Hagnyonowati, & Jauharany, F. F. (2021). Analisa Zat Gizi dan Tingkat Kesukaan Pada Tepung Talas Bening (xanthosoma undipes koch) Sebagai Pangan Fungsional Untuk Menurunkan Kadar Gula Darah efek metabolik yaitu mengurangi episode hipoglikemia . (Giacco R , 2002) . glikemik yang renada dari s. *Prosiding Seminar Nasional UNIMUS*, *4*, 1689–1697.

Hakiki, D. N., Rostianti, T., Nasir, & Nursuciyoni. (2019). Development of Local Food Biodiversity of Nata De Taro from Talas Beneng (Xanthosoma undipes k. koch.). *IOP Conf. Series*: *Earth and Environmental Science*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/309/1/012030

Haliza, W., Kailaku, S. I., & Yuliani, S. (2012). Optimation of Brownies Formula Based on Banten Taro Flour (Xanthosoma Undipes K. Koch) as Source of Dietary Fiber Using Response Surface Methodology. *Jurnal Penelitian Pascapanen Pertanian*, *9*(2), 96–106.

Kementerian Perdagangan. (2013). *Laporan Akhir Analisis Dinamika Konsumsi Pangan Masyarakat Indonesia*. Jakarta (ID).

Kerbs, B. (2015). Xanthosoma undipes (Araceae) as a food source for black-chinned Mountain-Tanager (Anisognathus notabilis) and Orange-Bellied euphonia (euphonia xanthogaster) in Nortwest Ecuador. *Ornitologia Neotropical*, *26*(1), 103–107.

Kurdi, W. (2002). *Reduksi Kalsium Oksalat pada Talas Bogor (Colocasia esculenta (L.) Schott) sebagai Upaya Meningkatkan Mutu Keripik*. Bogor: IPB.

Kusumasari, S., & Pamela, V. Y. (2019). Sensory evaluation of synbiotic yoghurt with Banten taro flour as prebiotic. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/383/1/012044

Kusumasari, S, Eris, F. R., Mulyati, S., & Pamela, V. Y. (2019). Karateristik sifat fisiokimia tepung talas beneng sebagai pangan khas kabupaten padgelang. *Jurnal Agroekotek*, *11*(2), 227–234.

Lestari, S., & Susilawati, P. N. (2015). Uji organoleptik mie basah berbahan dasar tepung talas beneng (Xantoshoma undipes) untuk meningkatkan nilai tambah bahan pangan lokal Banten. *Prosiding Seminar Nasional Masyarakat Biodiversitas Indonesia*, *1*(4), 941–946. https://doi.org/10.13057/psnmbi/m010451

Maulani, T. R., K, R. U., & Mulyana, A. (2019). Pengembangan Produk Makaroni Dari Tepung Talas Beneng Dengan Penambahan Daun Kelor (Moringa oleifera L). *Gorontalo Agriculture Technology Journal*, *2*(2), 69–78.

Mayasari, N. (2002). *Pengaruh Penambahan Larutan Asam dan Garam Sebagai Upaya Reduksi Oksalat pada Tepung Talas (Colocasia esculenta (L.) Schott)*. Bogor: IPB.

Muttakin, S., Muharfiza, & Lestari, S. (2015). Reduksi kadar oksalat pada talas lokal Banten melalui perendaman dalam air garam. *Prosiding Seminar Nasional Masyarakat Biodiversitas Indonesia*, *1*, 1707–1710. https://doi.org/10.13057/psnmbi/m010732

Pancasasti, R. (2016). Pengaruh Elevasi Terhadap Kadar Asam Oksalat Talas Beneng (Xanthosoma undipes K.Koch) Di Sekitar Kawasan Gunung Karang Provinsi Banten. *Setrum : Sistem Kendali-Tenaga-Elektronika-Telekomunikasi-Komputer*, *5*(1), 21. https://doi.org/10.36055/setrum.v5i1.890

Putriana, I., & Siti, A. (2013). Mutu Fisik, Kadar Serat dan Sifat Organoleptik Nata de Cassava Berdasarkan Lama Fermentasi. *Jurnal Pangan Dan Gizi*, *4*, 29–39.

Ramadhan, R. P., Aminah, S., Wardana, I. P., Subekti, N. A., & Putra, M. T. P. (2022). Kelembagaan Talas Beneng : Instrumen penting mewujudkan agribisnis talas beneng berkelanjutan (Pengembangan Talas Beneng di Kabupaten Pandeglang, Banten). *Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian Agribisnis VI Volume 6*, (1), 433–439.

Rostianti, T., Hakiki, D., Ariska, A., & Sumantri, S. (2018). Karakterisasi Sifat Fisikokimia Tepung Talas Beneng sebagai Biodiversitas Pangan Lokal Kabupaten Pandeglang. *Gorontalo Agriculture Technology Journal*, *1*(2), 1. https://doi.org/10.32662/gatj.v1i2.417

Suhaendah, E., Fauziyah, E., P., L. A. G., Sudomo, A., & Suhartono. (2021). Pertumbuhan Talas Beneng (Xanthosoma undipes K. Koch) pada Pola Agroforestri (Growth of Taro Beneng (Xanthosoma undipes K.Koch) in Agroforestry Pattern). *Jurnal Agroforestri Indonesia*, *4*(1), 61–68.

Supriyadi, D. (2022). *Prospek Talas Beneng*. Jakarta (ID): Ditjen Tanaman Pangan - Kementan.

Suryani, E., & Dariah, A. (2012). Peningkatan produktivitas tanah melalui sistem agroforestri. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, *6*(2), 101–109.

Syarif, M., Rinnai, H., & Fahmi, F. (2007). *Pemeriksaan Kadar Oksalat dalam Daun Singkong (Manihot utilisima Pohl.) dengan Metode Spektrometri kinetik*. Universitas Sriwijaya, Ogan Komering Ilir.

Wahyudi, D. (2010). *Pengaruh Suhu Perendaman terhadap Kandungan Oksalat dalam Talas pada Proses Pembuatan Tepung Talas*. Bogor: IPB.

Wibisana, A., Aulia, D. N., Nuidayah, S., Anggaraeni, D. H., & D.A., F. C. (2022). Karakteristik Pati Talas Banten Yang Dimodifikasi Menggunakan Asetat Anhidrida. *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, *6*(Januari), 33–38.

Wijayati, P. D., Harianto, N., & Suryana, A. (2019). Permintaan Pangan Sumber Karbohidrat di Indonesia. *Analisis Kebijakan Pertanian*, *17*(1), 13. https://doi.org/10.21082/akp.v17n1.2019.13-26.

Yuniarsih, E., Adawiyah, D. R., & Syamsir, E. (2019). Karakter Tepung Komposit Talas Beneng dan Daun Kelor pada Kukis Character of Composite Flour of Beneng Taro and Moringa oleifera Leaves to Cookies. *Jurnal Mutu Pangan*, *6*(1), 46–53. https://doi.org/10.29244/jmpi.2019.6.46.

POTENSI TANAMAN KELOR DALAM PERTANIAN BERKELANJUTAN DAN MANFAATNYA SEBAGAI MAKANAN SUPER

THE POTENTIAL OF MORINGA OLEIFERA IN SUSTAINABLE AGRICULTURE AND ITS BENEFITS AS SUPER FOOD

Rina Rismaya*, Iffana Dani Maulida, Eko Yuliastuti Endah Sulistyawati, Dini Nur Hakiki, Athiefah Fauziyyah, Mutiara Ulfah, Mohamad Rajih Radiansyah

Program Studi Teknologi Pangan, Jurusan Pertanian, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

*rinarismaya@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Jumlah populasi manusia yang terus meningkat secara eksponensial memberikan ancaman kelangkaan pasokan pangan di masa depan, sehingga diperlukan pengembangan sistem usaha pertanian berkelanjutan untuk mewujudkan ketahanan pangan nasional yang sejalan dengan era Society 5.0. Konsep pencapaian ketahanan pangan tidak hanya untuk memenuhi kebutuhan pangan masyarakat secara kuantitas saja, melainkan untuk mewujudkan sumber daya masyarakat yang berkualitas melalui pemenuhan pangan yang bernilai gizi baik. Penyesuaian dalam proses usaha tani melalui budidaya tanaman pangan dan hortikultura yang memiliki nilai gizi tinggi, bermanfaat terhadap kesehatan dan kemampuan tumbuh dalam berbagai kondisi ekstrem akibat perubahan iklim akan berkontribusi dalam praktik sistem pertanian berkelanjutan yang dapat mewujudkan ketahanan pangan. Salah satu tanaman hortikultura yang memiliki kemampuan adaptasi yang baik terhadap berbagai kondisi ekstrem, dan telah banyak digunakan di berbagai negara untuk mengentaskan kemiskinan dan memerangi kasus malnutrisi adalah tanaman kelor (Moringa oleifera). Di Indonesia, tanaman ini belum dibudidayakan secara intensif di mana biasanya dibiarkan tumbuh di depan pekarangan sebagai tanaman pagar atau dimanfaatkan sebagai pakan hewan ternak. Pemanfaatan tanaman kelor sebagai pangan masih terbatas pada teknologi pengolahan

pangan yang sederhana, seperti direbus atau disayur. Belum optimalnya budidaya dan pemanfaatan tanaman kelor menjadi produk pangan dimungkinkan karena kurangnya artikel-artikel yang membahas secara lengkap mengenai potensi ekonomi dan manfaat kelor sebagai pangan serbaguna yang kaya zat gizi dan memiliki manfaat kesehatan. Artikel ini bertujuan memberikan informasi perkembangan kajian riset mengenai potensi ekonomi, nilai gizi dan manfaat kesehatan tanaman kelor, sehingga diharapkan dapat dilakukan upaya budidaya secara berkelanjutan dan diolah secara optimal oleh masyarakat Indonesia.

Kata Kunci: *ketahanan pangan, makanan super, moringa oleifera, pangan berkelanjutan, pertanian berkelanjutan.*

ABSTRACT

Human populations increased exponentially threaten food supply scarcity in the future, so it is necessary to develop a sustainable agriculture to realize national food security. The concept of achieving food security is not only to meet the quantity of food needs, but to realize quality community resources through the fulfillment of good nutritional foods. Adjustments in the farming process by cultivating food and horticulture crops that have high nutrition, beneficial to health, and are resistant to various extreme conditions are practices of sustainable agricultural systems as an effort to achieve food security in line with society 5.0. Moringa oleifera is a horticulture crop that has good adaptability to various extreme conditions, and has been widely used in various countries to alleviate poverty and combat malnutrition. In Indonesia, this plant has not been cultivated intensively where it is usually grow in front of the yard as a hedge or used as animal feed. The use of Moringa plants as food is still limited in using simple processing technology, such as boiled or cooked as vegetable soup. The lack of optimal cultivation and utilization of Moringa plants as food products is possible due to the lack of articles that fully discuss the economic potential and benefits of Moringa as a super food that is rich in nutrients and health benefits. This article aims to provide information on research studies regarding the economic potential, nutrition and health of Moringa plants, hopefully it can be cultivated sustainably and optimally processed as food by Indonesian.

Key Words: *food security, superfood, moringa oleifera, sustainable food, sustainable agriculture.*

PENDAHULUAN

Pangan merupakan kebutuhan dasar yang harus dipenuhi karena akan mempengaruhi kehidupan manusia di muka bumi. Dengan mengonsumsi pangan, manusia akan mampu bertahan hidup dengan tetap sehat, aktif dan produktif secara berkelanjutan. Pemenuhan pangan bagi setiap individu merupakan hak asasi manusia yang dijamin pemerintah dan diatur dalam Undang-Undang Dasar 1945. Batasan ketahanan pangan menurut Undang-Undang Nomor 12 Tahun 2012 tentang Pangan tidak hanya terletak pada aspek kuantitas atau terpenuhinya jumlah kebutuhan pangan masyarakat secara merata hingga tingkat perorangan, melainkan pangan tersebut harus memenuhi aspek kualitas mutu yang baik, aman dikonsumsi, beragam, memenuhi kecukupan gizi, tidak bertentangan dengan agama, keyakinan dan budaya masyarakat serta terjangkau secara ekonomi.

Dalam upaya mewujudkan ketahanan pangan tentunya menghadapi berbagai tantangan, diantaranya adalah pertumbuhan populasi manusia yang terus meningkat memberikan ancaman krisis atau kelangkaan pangan. Teori Malthus (1798) menyatakan bahwa pertumbuhan jumlah manusia terus meningkat secara eksponensial, sementara jumlah usaha penyedia pangan hanya mampu bertambah secara aritmatika, sehingga kondisi ini memberikan ancaman akan adanya krisis pangan bagi manusia yang hidup di masa mendatang. Untuk mengatasi ancaman teori Malthus, diperlukan pengembangan sistem pertanian berkelanjutan melalui budidaya tanaman pangan dan hortikultura yang tahan terhadap kondisi ekstrem, memiliki nilai ekonomi, nilai gizi dan manfaat kesehatan yang bertujuan mewujudkan ketahanan pangan. Pengembangan sistem pertanian berkelanjutan ini sejalan dengan era society 5.0 yang tidak hanya menekankan pengembangan pada aspek ekonomi saja namun juga kebermanfaatan bagi masyarakat.

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi tingkat produksi dan produktivitas tanaman pangan dan hortikultura yang menjadi tantangan dalam mewujudkan ketahanan pangan yang berkelanjutan, diantaranya: 1) bersifat musiman; 2) sensitif terhadap perubahan cuaca dan iklim; 3) memerlukan perawatan yang intensif seperti penyiraman, pemberian

pupuk dan penyemprotan obat hama dan penyakit tanaman; 4) dipengaruhi oleh bagian permukaan bumi tertentu yang berhubungan dengan suhu dan kelembapan, misalnya padi, pisang, dan kelapa tumbuh di dataran rendah sementara sayuran, buah-buahan, teh dan kopi tumbuh di dataran tinggi; 5) dipengaruhi oleh kondisi tanah, misalnya kondisi tanah harus memiliki unsur hara dan drainase air yang cukup baik; 6) tidak mampu bertahan dalam kondisi kekeringan dalam rentang waktu yang cukup lama; dan 7) tidak mampu tumbuh pada daerah penggurunan (desertifikasi). Umumnya, penggurunan disebabkan oleh adanya perubahan iklim yang menyebabkan kondisi tanah yang kering menjadi semakin gersang, sehingga tanah tidak lagi dapat menyerap air hujan, dan akan kehilangan unsur hara penting.

Beberapa penelitian ilmiah menyatakan bahwa tanaman kelor telah diidentifikasi sebagai tanaman hortikultura yang bersifat serbaguna dengan kemampuan adaptasi tumbuh yang sangat baik. Dengan karakteristiknya yang tahan terhadap kondisi ekstrem, tanaman kelor telah digunakan untuk memperbaiki ekosistem yang telah rusak parah (Amaglo, Deng, & Foidl, 2017). Bahkan kelor telah diperkenalkan untuk dibudidayakan di Arab Saudi karena kemampuan adaptifnya dalam melawan penggurunan (Adeyemo, 2017; Domenico, Lina, & Francesca, 2019). Di samping kemampuan adaptasi lingkungan yang sangat baik, semua bagian kelor memiliki manfaat dan nilai jual (El-Hack et al., 2021). Biji kelor diteliti memiliki sifat antimikroba dan telah banyak digunakan untuk meningkatkan kualitas air, sementara bagian daun kelor telah dimanfaatkan dalam pengobatan 300 macam jenis penyakit dan digunakan sebagai pangan fungsional untuk mengurangi jumlah kasus kurang gizi di beberapa negara miskin di dunia (Gopalakrishnan, Doriya, & Kumar, 2016). Oleh karena itu, tanaman kelor dinilai penting untuk dibudidayakan dalam sistem pertanian berkelanjutan dilihat dari aspek lingkungan, ekonomi dan manfaatnya.

Tanaman kelor mampu tumbuh dengan baik di seluruh bagian wilayah di Indonesia. Akan tetapi, sangat disayangkan, tingginya potensi dan manfaat tanaman kelor belum dimanfaatkan secara optimal. Tanaman ini sering dikaitkan dengan hal-hal mistis seperti menghilangkan susuk, menangkal ilmu santet dan memudahkan orang yang sulit meninggal dunia

karena ilmu hitam yang dimilikinya, serta sering digunakan untuk sesajen yang bertujuan untuk mendatangkan rezeki. Namun, kini telah banyak penelitian yang menunjukkan bahwa tanaman kelor memiliki kandungan gizi dan manfaat kesehatan yang sangat besar yang berpotensi untuk dibudidayakan dan dimanfaatkan sebagai pangan fungsional. Artikel ini disusun melalui kajian pustaka dari beberapa jurnal ilmiah yang bertujuan memberikan informasi mengenai potensi ekonomi, nilai gizi dan manfaat kesehatan tanaman kelor, sehingga diharapkan dapat dibudidayakan secara berkelanjutan dan dimanfaatkan secara optimal oleh masyarakat di Indonesia.

PEMBAHASAN

1. Klasifikasi Tanaman Kelor

Tanaman kelor memiliki 13 spesies, diantaranya adalah *Moringa oleifera, Moringa arborea, Moringa borziana, Moringa concanensis, Moringa drouhardii, Moringa hildebrandtii, Moringa longituba, Moringa ovalifolia, Moringa peregrina, Moringa pygmaea, Moringa rivae, Moringa ruspoliana, Moringa stenopetala* (Fahey et al., 2018). Spesies dari famili *Moringaceae* yang telah banyak dibudidayakan dan diperkenalkan ke seluruh dunia adalah speses *Moringa oleifera* Lam. Berikut ini adalah klasifikasi berhirarki tanaman kelor menurut *taxonomic serial number* (TSN) 503874 tentang *Moringa oleifera* Lam. yang diperoleh dari *Integrated Taxonomy Information System* (ITIS):

Kingdom : *Plantae* (tumbuhan)
Subkingdom : *Viridiplantae* (tumbuhan hijau)
Infrakingdom : *Streptophyta* (tanaman darat)
Super divisi : *Embryophyta*
Divisi : *Traceophyta* (tanaman berpembuluh)
Subdivisi : *Spermatophyta* (tanaman berbiji)
Klas : *Magnoliopsida*
Super Ordo : *Rosanae*
Ordo : *Brassicales*
Famili : Moringaceae
Genus : *Moringa* Adans.
Spesies : *Moringa oleifera* Lam.

2. Sejarah Persebaran Tanaman Kelor

Tanaman kelor merupakan tanaman yang berasal dari India, dan tersebar luas di wilayah Pakistan, Bangladesh, Afganistan dan daerah sub-Himalaya serta daerah Amerika, Afrika, Eropa dan Oseania. Menurut sejarah, sejak dulu kelor mulai telah banyak digunakan oleh orang Romawi Kuno, Yunani, dan Mesir serta saat ini telah banyak digunakan orang Afrika dan Asia untuk memenuhi kebutuhan gizi dan pengobatan. Dengan kemampuan adaptasi terhadap berbagai kondisi ekstrem, tanaman kelor saat ini telah banyak ditemukan hampir di seluruh dunia, termasuk Asia Selatan, Asia Tenggara, Semenanjung Arab, Amerika Tengah, Amerika Selatan dan Afrika. Di Amerika, semua bagian tanaman kelor dapat dan telah lama dikonsumsi untuk melengkapi kebutuhan zat gizi manusia, sementara di daerah Afrika dan negara-negara miskin lainnya, tanaman kelor telah dimanfaatkan untuk memerangi malnutrisi akibat kelaparan yang berkepanjangan. Di Arab Saudi, tanaman kelor telah mulai diperkenalkan dengan tujuan meningkatkan perekonomian negara dan untuk memerangi penggurunan (Mridha, 2015; Domenico, Lina, & Francesca, 2019). Saat ini tanaman kelor mulai banyak diperkenalkan hampir di seluruh dunia untuk dibudidayakan dan dimanfaatkan untuk tujuan pangan maupun pengobatan.

3. Ragam Nama Tanaman Kelor

Di Indonesia sebagai daerah tropis, tanaman kelor mampu tumbuh dengan subur hampir di hampir seluruh wilayah Indonesia. Tanaman kelor di Indonesia sendiri memiliki sebutan nama tertentu berdasarkan daerah tumbuhnya seperti Kelor di Jawa, Sunda, Bali dan Lampung; Moranggih di Madura; Moltong di Flores; Kelo di Ternate; Keloro di Bugis; kawona di Sumbawa; Ongge di Bima, dan Murong/Barunggai di Sumatera (Isnan & Nurhaedah, 2017). Selain di Indonesia, kelor di berbagai negara pun memiliki beragam sebutan nama diantaranya adalah Saguna atau Sainjna di India, Marungue di Francis, Angela, Ben, Moringa di Spanyol, Ewe Ile di Nigeria, Angela di Colombia, Palo Jeringa di Cuba, Dangap di Somalia, Teberinto di El Savador, Marum di Thailand, Suhanjna di Pakistan, Sajina di Bangladesh, Mupulanga di Zimbabwe, Cedro di Brazil, Mlonga di Tanzania dan Haleko di Ethiopia (Kurniasih, 2013; Ribaudo, Povolo, & Zagotto, 2019).

4. Karakteristik dan Budidaya Tanaman Kelor

Tanaman kelor memiliki tinggi sekitar 3 meter pada tahun pertama dan dapat mencapai ketinggian 10-12 meter. Tanaman perdu ini dapat tumbuh dengan baik di daerah subtropis maupun daerah tropis. Pertumbuhan optimal kelor berada pada ketinggian tanah < 600 meter di atas permukaan laut, namun dapat tumbuh pada ketinggian hingga mencapai 1200 meter di atas permukaan laut. Tanaman kelor tumbuh dengan baik pada tanah berpasir maupun tanah berlempung dengan beragam jenis pH tanah (pH 5,0-9,0), akan pH tanah optimum pada kondisi sedikit asam hingga netral (6,3-7,0). Selain itu, tanaman kelor tumbuh dengan baik pada suhu lingkungan 25-35 °C, namun dapat tumbuh pada kondisi suhu tinggi 48 °C dan kondisi embun beku ringan. Dalam proses budidaya, tanaman kelor tidak perlu dipupuk dan disiram secara rutin, dan umumnya tahan terhadap hama dan penyakit tanaman. Selama pertumbuhan dan perkembangannya, tanaman kelor membutuhkan curah hujan tahunan antara 250 dan 3000 mm, namun mampu bertahan dalam kekeringan hingga 6 bulan pada musim kering serta dapat tumbuh pada daerah pergurunan (Pereira et al., 2016; Domenico, Lina, & Francesca, 2019).

Penanaman kelor dapat dilakukan dengan cara menanam biji maupun cara stek batang. Budidaya kelor dengan cara stek batang telah dilakukan di India. Akar tanaman kelor yang ditanam dengan cara distek memiliki akar tunggal yang tidak dalam, namun akan memiliki banyak percabangan untuk menghasilkan banyak daun dan buah. Sementara untuk penanaman melalui biji akan memiliki akar tunggang yang sangat kokoh dengan pohon cenderung tumbuh tinggi ke atas dengan sedikit percabangan. Tanaman kelor membutuhkan waktu selama satu tahun untuk pembentukan akar. Pada tahun pertama tanaman kelor memiliki akar yang kuat, memiliki tinggi kira-kira 3 meter dan sudah dapat menghasilkan bunga dan buah. Tanaman kelor akan terus tumbuh dan berkembang hingga mampu menghasilkan polong sebanyak 300-600 buah pada usia 3 tahun dan semakin dewasa mampu menghasilkan polong hingga 1600 buah.

Beberapa kondisi yang perlu diperhatikan dalam proses penanaman dan perbanyakan tanaman kelor, diantaranya: 1) Jarak tanam yang tepat untuk budidaya kelor adalah 1 meter x

1 meter (10.000 tanaman kelor per ha). Pemberian jarak tanam yang cukup renggang bertujuan untuk memastikan sistem penetrasi akar yang baik tanpa menyebabkan adanya risiko erosi tanah; 2) bibit tanaman kelor harus ditanam pada lubang tanah berkedalaman 30-50 cm dengan lebar 20-40 cm, sehingga tanaman dapat tumbuh dengan perakaran yang kuat; 3) waktu terbaik penanaman kelor adalah diawal musim hujan, namun tanaman kelor dapat ditanam sepanjang tahun (Kurniasih, 2013).

5. Potensi dan Manfaat Tanaman Kelor

a. Potensi Ekonomi

Pada mulanya, tanaman kelor di Indonesia kurang dimanfaatkan dan dibiarkan tumbuh liar sebagai tanaman pagar dan pakan ternak. Akan tetapi, kini telah banyak penelitian yang menunjukkan bahwa tanaman ini memiliki nilai gizi yang tinggi dan manfaat yang besar sehingga dijuluki sebagai "Pohon Ajaib" atau *"The Miracle of Tree"* (Reinert, 2018). *World Health Organization* (WHO) juga menyatakan bahwa tanaman kelor memiliki nilai gizi yang sangat tinggi, sehingga menjulukinya sebagai *super food* (Winarno, 2018). Tanaman kelor telah banyak diteliti mampu mengurangi kasus malnutrisi dan mengatasi masalah penggurunan, serta meningkatkan ketahanan pangan. Seiring dengan perkembangan riset mengenai besarnya potensi dan manfaat kelor, permintaan masyarakat dan industri terhadap tanaman kelor menjadi semakin meningkat. Permintaan kelor yang tinggi menawarkan peluang pasar yang luas bagi petani sebagai produsen yang berkontribusi pada proses produksi tanaman kelor.

Secara ekonomi, proses budidaya tanaman kelor dapat menguntungkan karena setiap bagian tanaman kelor diminati banyak negara. Petani kelor dapat memanfaatkan sisa ampas biji kelor dari hasil ekstraksi sebagai pupuk alami. Sementara, hasil dari produksi tanaman kelor, semua bagian dari tanaman kelor mulai dari daun, bunga, buah, biji, batang, akar dapat memiliki nilai jual dan memiliki pasar yang luas. Negara-negara besar yang mengimpor daun dan biji kelor adalah Amerika Serikat, Jerman, Cina, Canada, Korea Selatan, dan negara-negara Eropa seperti Inggris, Italia, Belanda dan Spanyol. Ukuran pasar dunia untuk produk kelor pada tahun 2018 adalah US$ 5,5 miliar dan diperkirakan akan melampaui US$ 10 miliar pada

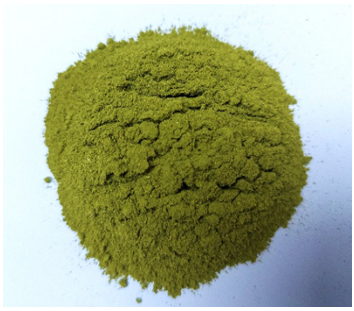
tahun 2025. Saat ini, India telah berhasil memegang posisi yang dominan di pasar ekspor kelor dengan menyumbang 80% dari total produksi daun kelor dunia yang berkontribusi dalam meningkatkan perekonomian nasional India (Malhotra, 2021). Di Afrika, budidaya tanaman kelor dapat menguntungkan secara ekonomi bagi petani kecil di pedesaan dan kelompok marjinal yang mendominasi kegiatan praktik produksi primer tanaman kelor (Mashamaite et al., 2021).

b. Kandungan Gizi dan Manfaat Kesehatan

Tanaman kelor memiliki daun yang mengandung komponen gizi paling lengkap dibandingkan buah dan sayur. Daun kelor segar mengandung vitamin A empat kali lebih banyak dibandingkan dengan wortel (6780 mg vs 1890 mg/100 g) dan vitamin C tujuh kali lebih banyak dibandingkan jeruk (220 mg vs 30 mg/100 g), kalsium empat kali lebih banyak dibandingkan susu (440 mg vs 120 mg/100 g), dan potasium tiga kali lebih banyak dibandingkan pisang (259 mg vs 88 mg/100 g) serta kadar protein dua kali lebih banyak dibandingkan yogurt (Mahmood et al., 2010; Novita & Athaillah, 2022).

Agar daun kelor dapat dimanfaatkan sepanjang tahun biasanya diolah menjadi bentuk tepung melalui proses pengeringan dan penggilingan. Penampakan secara visual daun kelor segar dengan tepung daun kelor dapat dilihat pada Gambar 1.a dan 1.b**.** Tepung daun kelor dibandingkan dengan daun segar memiliki beberapa keunggulan, diantaranya adalah memiliki kandungan gizi yang lebih terkonsentrasi, memiliki umur simpan yang lebih panjang dan lebih mudah didistribusikan dan diaplikasikan dalam proses pengolahan pangan. Kandungan gizi dan serat pangan daun kelor segar dan daun kelor kering dapat dilihat pada Tabel 1.

Gambar 1.a
Daun Kelor Segar dengan Tangkai



Gambar 1.b
Tepung Daun Kelor

Tabel 1. Kandungan Gizi dan Serat Daun Segar dan Daun Kelor Kering (*Moringa oleifera*)

No	Kandungan zat/ unsur	Satuan	Dalam 100 g bahan	
			Daun Kelor Segar	Daun kelor Kering
1	Kandungan air	g	75,00	7,50
2	Protein	g	6,70	27,10
3	Lemak	g	1,70	2,30
4	Karbohidrat	g	12,50	38,20
5	Kalori	kkal	92,00	205,00
6	Serat	g	0,90	19,20
7	Beta karoten (Vitamin A)	mg	6,78	18,90
8	Thiamin (Vitamin B1)	mg	0,06	2,64
9	Riboflavin (Vitamin B2)	mg	0,05	20,05
10	Vitamin C	mg	220,00	17,83
11	Kalsium (Ca)	mg	440,00	2,00
12	Zat Besi (Fe)	mg	0,85	28,20

No	Kandungan zat/ unsur	Satuan	Dalam 100 g bahan	
			Daun Kelor Segar	Daun kelor Kering
13	Fosfor (P)	mg	70,00	204,00
14	Kalium (K)	mg	259,00	1324,00
15	Zinc (Zn)	mg	0,16	3,29
16	Magnesium (Mg)	mg	42,00	368,00
17	Copper (Cu)	mg	0,07	0,57
18	Sulphur (S)	mg	137,00	870,00

Sumber: Krisnadi, 2015

Tanaman kelor mengandung komponen fitokimia yang memberikan efek fungsional terhadap kesehatan. Komponen fitokimia memiliki kapasitas antioksidan, antimikroba, anti-inflamasi dan antipiretik, antivirus, antijamur, antikanker (Gaxiola et al., 2021; Domenico, Lina, & Francesca, 2019). Komponen fitokimia terdapat hampir di semua bagian tanaman kelor. Daun kelor mengandung pigmen flavonoid dalam jumlah tinggi mulai dari 2.35 hingga 13.23 g/100 g (Vongsak et al., 2013). Jumlah ini dua kali lebih tinggi daripada jumlah flavonoid pada sayuran lain seperti bayam, brokoli dan kacang polong (Gopalakrishnan, Doriya, & Kumar, 2016). Bagian bunga *Moringa oleifera* telah diteliti mengandung pigmen flavonoid seperti quercetin, kaempferol, rhamnetin, isoquercitrin, dan kaempferitrin yang memiliki manfaat kesehatan sebagai stimulan, afrodisiak, diuretik, dan kolagoga (Amaglo et al., 2010).

Kandungan protein tanaman kelor cukup tinggi, sehingga biasanya dimanfaatkan sebagai sumber protein yang murah bagi penduduk berpenghasilan rendah di negara berkembang (Mune-Mune et al., 2016). Daun kelor kering memiliki kandungan protein berkisar antara 25.0%-31.00% (Brilhante et al., 2017). Bagian biji kelor mengandung protein sekitar 40%, bagian bunga dan polong kelor memiliki kandungan protein sekitar 30%, sedangkan batang kelor memiliki protein sebesar 13% (Teixeira et al., 2014). Kernel kelor yang berlemak dan kernel kelor yang dihilangkan lemaknya memiliki kandungan protein yang tinggi, masing-masing adalah 36.18% dan 62.76% (Ogunsina et al., 2010).

Bagian tanaman kelor yang memiliki kandungan minyak paling tinggi adalah biji kelor. Satu pohon kelor dewasa (usia 3 tahun) dapat menghasilkan 15.000 hingga 25.000 biji per tahun dan sebuah perkebunan kelor dapat menghasilkan 3.000 kg biji/ha. Jumlah ini akan menghasilkan minyak biji kelor sebanyak 900 kg/ha (rendemen minyak 30%), sementara kedelai rata-rata 3.000 kg biji/ha akan menghasilkan rendemen minyak hanya sebesar 20% (Mohammed et al., 2003). Minyak kelor terdiri dari *Mono Unsaturated Fatty Acid* (MUFA) dalam jumlah cukup tinggi yaitu 68%-80% yang menjadikan minyak biji kelor sebagai sumber asam lemak oleat yang sangat baik, sehingga dapat menjadi pengganti minyak zaitun yang memiliki harga cukup mahal (Nadeem & Imran, 2016). Asam lemak oleat dinilai lebih sehat, lebih stabil terhadap ketengikan oksidatif yang berguna dalam sistem pangan. Selain itu, minyak biji kelor juga mengandung sekitar 21% asam palmitat yang pada umumnya digunakan sebagai minyak goreng. Daun kelor memiliki kandungan lipid yang tersembunyi (*invisible fat*) yang berkisar antara 1,7% hingga 2,3% pada daun segar, hingga 5,2% pada daun kering. Komponen lipid dari kelor juga mengandung sejumlah besar senyawa penting seperti fitosterol seperti stigmasterol (23,78%), β-sitosterol (11,78%), △7-stigmasterol (16,60%) dan △7-campesterol (74,39%), kampesterol yang memberikan aksi fisiologis/biologis esensial, misalnya prekursor hormon (Anwar & Rashid, 2007).

Daun kelor memiliki kandungan lemak dan karbohidrat yang rendah, namun kaya akan mineral zat besi dan vitamin B, vitamin A, vitamin C, mineral, tiamin, protein, b-karoten, dan riboflavin (Omotesho et al., 2013). Mineral yang dominan pada daun *Moringa oleifera* adalah kalium, kalsium, besi, seng, selenium dan magnesium. Daun kelor diketahui sebagai sumber vitamin dan mineral yang memberikan manfaat kesehatan yang dapat dikonsumsi sebagai pangan dengan tujuan tertentu. Daun kelor kering biasanya ditambahkan ke dalam resep makanan dengan tujuan untuk meningkatkan nilai gizi makanan menjadi program nasional di India (Nambiar et al., 2003). Tingginya kandungan gizi pada daun kelor telah diteliti oleh Estrella et al. (2000) dapat meningkatkan produksi ASI dari ibu yang melahirkan bayi prematur di hari ketiga hingga kelima pasca-persalinan. Di sebagian besar Filipina, ibu menyusui mengonsumsi daun kelor bernilai gizi tinggi yang dicampur dalam sup ayam atau kerang untuk meningkatkan produksi ASI (Krisnadi, 2015).

Tanaman kelor memiliki banyak manfaat kesehatan, bahkan semua bagian tanaman ini telah digunakan untuk tujuan pengobatan beberapa penyakit. Beberapa penelitian membuktikan daun kelor memiliki sifat antidiabetes, efek antiobesitas, sifat antitumor dan aktivitas antiulkus. Bagian biji kelor dan bagian lain dari tanaman kelor diketahui memiliki sifat antibiotik dan antiinflamasi yang berguna untuk mengobati radang sendi, rematik, asam urat, kram; selain tindakan terhadap penyakit menular seksual, bisul dan *epilepsy.* Kandungan protein dan serat yang tinggi pada polong kelor dapat mengobati diare, terutama pada anak-anak. Sampai saat ini, tidak ada efek samping yang dilaporkan terkait dengan studi pengobatan tanaman kelor pada manusia. Meskipun demikian, khasiat tanaman kelor sebagai obat perlu dibuktikan dengan penelitian-penelitian ilmiah di mana *Food Drug Administration* (FDA) meminta lebih banyak bukti ilmiah untuk dapat menyetujui ekstrak kelor sebagai obat (Domenico, Lina, & Francesca, 2019).

c. Manfaat Lain Tanaman Kelor

Terdapat beberapa manfaat lain dari setiap bagian tanaman kelor, diantaranya: 1) bubuk biji kelor berfungsi sebagai koagulan yang mampu mengikat partikel kotoran dalam air dan juga mampu menghilangkan 90-99% bakteri yang terkandung dalam air. Penggunaan bubuk kelor dalam pemurnian air dapat menggantikan bahan kimia seperti alumunium sulfat yang berbahaya jika dikonsumsi manusia, tidak ramah lingkungan dan tentu harganya lebih mahal dibandingkan bubuk biji kelor; 2) tanaman kelor dimanfaatkan sebagai *living fence*/pagar hidup; 3) tanaman kelor dapat dibudidayakan sebagai tamanan lorong/ *alley cropping* yang baik karena akar tunggang yang besar dan akar lateral yang sedikit pada tanaman kelor tidak akan bersaing untuk memperoleh nutrisi tanah dengan tanaman pangan dan hortikultura yang ditanam diantaranya. Selain itu, daun-daun tanaman kelor tidak menghalangi datangnya cahaya untuk tanaman pangan dan hortikultura yang ditanam diantaranya; 4) daun kelor yang dimasukkan ke dalam tanah sebelum ditanami bibit, dapat mencegah pembusukan perkecambahan bibit oleh jamur *Pythium debaryanum*; 5) daun kelor yang dihancurkan dapat digunakan untuk membersihkan peralatan memasak

maupun dinding-dinding bangunan; 6) bagian batang kayu tanaman kelor dapat digunakan sebagai bahan bakar kayu untuk memasak; 7) kulit batangnya dapat dibuat menjadi tali atau tikar; 8) serpihan kayu tanaman kelor dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan kertas dengan kualitas yang baik; 8) batang tanaman kelor juga dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan *viscose* resin yang digunakan di industri tekstil (HDRA, 2002).

6. Pemanfaatan Daun Kelor pada Produk Pangan

Beberapa penelitian telah memanfaatkan daun kelor sebagai *ingredient* pangan dengan berbagai tujuan penggunaan, diantaranya adalah meningkatkan nilai gizi produk dan memberikan efek fungsional bagi kesehatan pada produk pangan. Berikut ini adalah beberapa publikasi ilmiah yang mempelajari pengaruh penambahan daun kelor dalam pembuatan produk pangan terhadap karakteristik mutu produk yang dihasilkan:

a. *Cookies* yang diformulasikan dari Hanjeli (*Coix lacryma-jobi* L.) dan tepung daun kelor (*Moringa oleifera*) dalam penelitian Iwansyah et al. (2022) memiliki zat gizi tinggi, aman untuk dikonsumsi, dan memiliki sifat sensoris yang disukai. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *cookies* hanjeli-moringa memiliki protein (9,14%), lemak (24,67%), karbohidrat (61,62%), serat kasar (4,85%), dan energi (505,01 kkal) dapat dijadikan sebagai alternatif makanan bagi masyarakat yang membutuhkan energi tinggi dari produk makanan yang praktis dan siap saji.

b. Penelitian Anjani, Zakaria, & Widowatyn (2021) memanfaatkan daun kelor dalam pembuatan es krim. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kandungan kalsium pada es krim. Konsentrasi tepung daun kelor yang ditambahkan pada formula es krim adalah 0%, 3%, 6%, 9% dan 12%. Penambahan tepung daun kelor memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan kadar kalsium dan protein es krim. Hasil penelitian menunjukkan bahwa es krim dengan penambahan konsentrasi tepung daun kelor sebanyak 12% memiliki kadar kalsium 45,73 ppm dan protein 11,26% yang nilainya paling tinggi dibandingkan dengan es krim kontrol maupun perlakuan lainnya. Akan

tetapi, semakin tinggi konsentrasi tepung daun kelor yang ditambahkan, maka mutu sensoris dan daya leleh es krim semakin menurun, sehingga es krim dengan penambahan 3% tepung daun kelor memiliki penilaian sensoris terbaik dan memiliki daya leleh paling lama.

c. Pisang ijo merupakan kudapan khas Sulawesi selatan yang terbuat dari bahan baku terigu, gula pasir dan pisang raja. Penelitian Nahriana, Yahya, & Tawani (2022) menambahkan tepung daun kelor dan ekstrak daun kelor dalam formula kue pisang ijo dengan tujuan memberikan warna alami dan meningkatkan nilai gizi kue pisang ijo. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kue pisang ijo yang ditambahkan tepung daun kelor lebih disukai secara aroma, tekstur dan rasa, namun untuk atribut warna yang lebih disukai adalah kue pisang ijo yang ditambahkan ekstrak daun kelor karena memberikan warna hijau yang kuat dan terang. Sementara, berdasarkan uji kandungan gizi menunjukkan bahwa kadar protein dan vitamin C kue pisang ijo yang ditambahkan tepung daun kelor lebih tinggi dibandingkan kue pisang ijo yang ditambahkan ekstrak daun kelor. Kue pisang ijo yang ditambahkan tepung daun kelor memiliki kandungan protein sebesar 3,38% dan vitamin C sebesar 153.=,20 µg/g, sementara kue pisang ijo yang ditambahkan ekstrak daun kelor memiliki kandungan protein 3,31% dan vitamin C 127,72 µg/g. Hal ini dikarenakan zat gizi pada tepung daun kelor lebih terkonsentrasi dibandingkan ekstrak daun kelor segar.

d. Penelitian Srimiati dan Agestika (2022) mengkaji pengaruh penambahan daun kelor segar dan tepung daun kelor terhadap karakteristik sensoris dan fisikokimia *pudding*. Konsentrasi daun kelor segar yang digunakan adalah 0%, 20% dan 30%, sementara konsentrasi tepung daun kelor yang digunakan adalah 0%, 5% dan 10%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa skor kesukaan tertinggi setelah kontrol pada *pudding* yang ditambahkan daun kelor segar adalah konsentrasi 20%, sementara pada tepung daun kelor adalah konsentrasi 5%. Sementara hasil pengujian kandungan gizi menunjukkan bahwa kadar protein, kadar kalori dari lemak, total lemak, total karbohidrat dan kalori *pudding* daun kelor segar 20% lebih tinggi dibandingkan

dengan *pudding* tepung daun kelor 5%. Akan tetapi, pada nilai kadar abu dan kadar air *pudding* dari tepung daun kelor 5% lebih tinggi dibandingkan dengan *pudding* yang ditambahkan daun kelor segar 20%.

e. Penelitian Augustyn, Tumuhury, dan Dahoklory (2017) memformulasikan tepung daun kelor ke dalam pembuatan biskuit mocaf. Tepung mocaf sebagai bahan utama dalam pembuatan biskuit mocaf memiliki kandungan protein yang rendah, sehingga penambahan tepung daun kelor bertujuan untuk meningkatkan kadar protein biskuit mocaf. Konsentrasi tepung daun kelor yang ditambahkan dalam formula biskuit mocaf adalah 0% (kontrol), 3%, 6% dan 9%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biskuit mocaf dengan penambahan tepung daun kelor sebanyak 3% memiliki tingkat kesukaan paling tinggi pada semua atribut sensoris yang diuji. Biskuit mocaf terpilih memiliki kadar air 2,74%, kadar abu 1,41%, kadar protein 10,12%, kadar lemak 11,15%, kadar serat 2,20%, dan kadar karbohidrat 72,12% serta vitamin C 2,80 mg/bb.

f. Penelitian yang dilakukan Suhaemi et al. (2021) mengkaji pengaruh penambahan tepung daun kelor dalam pembuatan *nugget* terhadap kandungan protein, lemak, dan kolesterol, serta penilaian sensoris. Konsentrasi tepung daun kelor yang ditambahkan adalah 0% (kontrol), 0.,5% 1,0% dan 1.5%. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan tepung daun kelor dapat meningkatkan kadar protein, menurunkan kadar lemak dan kolesterol secara signifikan. Akan tetapi penambahan daun kelor pada pembuatan *nugget* secara signifikan dapat menurunkan nilai sensoris dari atribut rasa, warna dan tekstur *nugget* yang dihasilkan.

g. Penelitian Helingo, Liputo dan Limonu (2021) mengkaji pengaruh penambahan tepung daun kelor dalam formula roti berbahan dasar tepung sukun. Konsentrasi tepung daun kelor yang ditambahkan dalam formula roti sukun adalah 0% (kontrol), 3%, 5% dan 7%. Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan tepung daun kelor memberikan pengaruh signifikan peningkatan kadar air dan protein roti sukun. Semakin tinggi konsentrasi tepung daun kelor yang ditambahkan, maka semakin tinggi

kadar air dan kadar protein roti sukun yang dihasilkan. Kadar protein roti sukun kontrol (0% tepung daun kelor), roti sukun dengan perlakuan penambahan tepung daun kelor dengan konsentrasi 3%, 5% dan 7% masing-masing sebagai berikut: 7,05%; 27,98%; 28,76%, dan 29.42%. Akan tetapi, penambahan tepung daun kelor dapat menurunkan kemampuan pengembangan roti. Semakin tinggi konsentrasi tepung daun kelor yang ditambahkan, maka volume pengembangan roti semakin menurun.

h. Penambahan tepung daun kelor (*Moringa oleifera*) dalam bubur instan sebagai makanan pendamping ASI telah diteliti oleh Zakaria, Salim, Rauf & Rosmini (2020). Konsentrasi tepung daun kelor yang digunakan pada penelitian ini adalah 0% (kontrol), 3%, 4% dan 5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi penambahan 3% tepung daun kelor memberikan nilai kesukaan paling tinggi, namun penambahan tepung daun kelor hingga konsentrasi 5% masih dapat diterima secara sensoris.

7. Tanaman Kelor dalam Pertanian Berkelanjutan

Proses budidaya tanaman kelor dalam praktik pertanian yang berkelanjutan memberikan manfaat terhadap lingkungan. Tanaman kelor memiliki kemampuan yang baik dalam mengurangi kadar karbon dioksida di udara. Menurut Villafuerte dan Villafurte-Abonal (2009), tingkat penyerapan atau asimilasi karbon dioksida oleh pohon kelor 20 kali lebih tinggi dari tumbuh-tumbuhan pada umumnya dan 50 kali lebih tinggi dari pohon cedar Jepang. Oleh karena itu, pohon ini dapat menjadi alat yang berguna dalam pencegahan pemanasan global dan menjadi pilihan tanaman yang tepat untuk dibudidayakan dalam pertanian berkelanjutan.

Tanaman kelor menjadi pilihan terbaik untuk dibudidayakan dalam pertanian berkelanjutan berdasarkan beberapa pertimbangan, di antaranya adalah: 1) kemampuan tanaman kelor dalam beradaptasi pada kondisi lingkungan ekstrem yang diakibatkan oleh perubahan iklim. *Moringa oleifera* juga telah ditanam di Afrika, Nigeria dan diperkenalkan di Arab Saudi untuk mengurangi penggurunan; 2) proses budidaya tanaman kelor telah dimanfaatkan untuk memperbaiki ekosistem yang sudah rusak parah; 3) proses budidaya tanaman kelor

tidak memerlukan pemupukan dan penyiraman secara rutin, serta umumnya tahan terhadap hama dan penyakit tanaman, sehingga dapat mengurangi penggunaan senyawa kimia yang berdampak bagi kesuburan tanah dan lingkungan seperti pupuk kimia, insektisida, pestisida dan obat hama penyakit tanaman lainnya; 4) setiap bagian tanaman kelor kaya manfaat dan memiliki nilai jual dengan pasar yang sangat luar di berbagai negara; 5) biji tanaman kelor dapat berperan sebagai senyawa koagulan alami yang dapat digunakan untuk menjernihkan air. Penggunaan koagulan alami diharapkan dapat mengurangi penggunaan senyawa koagulan sintetis dari senyawa kimia; 6) sisa ampas biji kelor dari proses ekstraksi minyak mengandung protein cukup tinggi yang dapat dimanfaatkan sebagai alternatif pupuk alami sehingga diharapkan dapat mengurangi penggunaan pupuk kimia.

KESIMPULAN

Untuk meningkatkan produksi pangan yang berkelanjutan, diperlukan penyesuaian tanaman pangan baru yang memiliki potensi zat gizi tinggi, memiliki kemampuan adaptasi terhadap kondisi lingkungan ekstrem, memiliki dampak yang baik untuk perekonomian dan lingkungan. Oleh karena itu, tanaman kelor merupakan pilihan yang tepat untuk dikembangkan dalam praktik pertanian berkelanjutan karena beberapa pertimbangan, diantaranya: 1) sumber protein murah bagi penduduk berpenghasilan rendah di negara-negara miskin dan berkembang; 2) setiap bagian tanaman kelor memiliki manfaat, nilai jual yang tinggi dan memiliki pasar yang luas di berbagai negara; 3) kemampuan yang baik dalam mengurangi kadar karbon dioksida di udara; 4) kemampuan adaptasi terhadap lingkungan ekstrem dan telah dimanfaatkan untuk melawan penggurunan dan memperbaiki ekosistem yang telah rusak; 5) tidak memerlukan pemupukan dan pemberian obat hama penyakit tanaman secara intensif, sehingga biaya input produksi rendah; 6) telah digunakan di berbagai negara untuk memerangi malnutrisi dan pengobatan berbagai penyakit; 7) telah dimanfaatkan dalam pengembangan produk pangan dengan tujuan untuk memperkaya nilai gizi dan memberikan efek fungsional pada produk pangan.

DAFTAR PUSTAKA

Adeyemo, R. (2017). Moringa sustainability: the capital and credit available in a developing country. *Acta Horticulturae*, 1158(48), 419–424. http://dx.doi.org/10.17660/actahortic.2017.1158.48

Amaglo, N.K., Deng, J., & Foidl, N. (2017). The potential of moringa in climate change, sustainable livelihood, and food security. *Acta Horticulturae*, 1158(53), 455-466. http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1158.53

Anjani, R., Zakaria, A., & Widowaty, W. (2021). The effect of moringa leaf (*Moringa oleifera* l.) powder substitution in physicochemical and organoleptic characteristics of ice cream. *Journal of Applied Food and Nutrition*, 2(1), 16-24.

Anwar, F., & Rashid, U. (2007). Physico-chemical characteristics of *Moringa oleifera* seeds and seed oil from a wild provenance of Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, 39, 1443–1453.

Augustyn, G.N., Tuhumury, H.C.D., & Dahoklory, M. (2017). Pengaruh penambahan tepung daun kelor (*Moringa oleifera*) terhadap karakteristik organoleptik dan kimia biskuit mocaf (*Modified Cassava Flour). Jurnal Teknologi Pertanian,* 6(2), 52-58. http://dx.doi.org/10.30598/jagritekno.2017.6.2.52

Brilhante, R.S.N., Sales, J.A., Pereira, V.S., Castelo-Branco, D.de S.C.M., Cordeiro, R.de A., Sampaio, C.M.de S., Paiva, M.de A.N., Santos, J.B.dos., Sidrim, J.J.C., & Rocha, M.F.G. (2017). Research advances on the multiple uses of *Moringa oleifera*: A sustainable alternative for socially neglected population. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 10(7), 621-630. http://dx.doi.org/10.1016/j.apjtm.2017.07.002 10.1016/j.apjtm.2017.07.002

Domenico, M., Lina, C., & Francesca, B. (2019). Sustainable crops for food security: moringa (Moringa oleifera Lam.). Reference Module in Food Science, 1, 409-415. http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.22574-2

El-Hack, M.E.A., Alqhtani, A.H., Swelum, A.A., El-Saadony, M.T., Salem, H.M., Babalghith, A.O., Taha, A.E., Ahmed, O., Abdo, M., & El-Tarabily, K.A. (2022). Pharmacological, nutritional and antimicrobial uses of *Moringa oleifera* Lam. leaves in poultry nutrition: an updated knowledge. *Poultry Science*. (In Press). https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102031

Estrella, P.M.C.P, Mantaring, J.B.V., David, G.Z., & Taup, M.A. (2000). A double-blind, randomized kontrolled trial on the use of malunggay (*Moringa oleifera*) for augmentation of the volume ofbreastmilk among non-nursing mothers of preterm infants. *The Philippine Journal of Pediatrics*, 49(1), 1-6.

Fahey, J.W., Olson, M.E., Stephenson, K.K., Wade, K.L., Chodur, G.M., Odee, D., & Hubbard, W.C. (2018). The diversity of chemoprotective glucosinolates in *Moringaceae* (*Moringa* spp.). *Scientific Reports*, 8(1), 1-14. http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-26058-4.

Gaxiola, S.A., Leon-Felix, J., Jimenez-Nevarez, J.B., Angulo-Escalantea, M.A., Ramos-Payan, R., Colado-Velazquez III, C., & Herediaa, J.B. (2021). Antioxidant and anti-inflammatory properties of novel peptides from *Moringa oleifera* Lam. leaves. *South African Journal of Botany*, 141, 466-473. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.05.033.

Gopalakrishnan, L., Doriya, K., & Kumar, D. S. (2016). *Moringa oleifera*: A review on nutritive importance and its medicinal application. *Food Science and Human Wellness*, 5(2), 49–56. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2016.04.001.

[HDRA]. *Henry Doubleday Research Association.* (2002). *Moringa Oleifera*: *A Multi-Purpose Tree*, Coventry, UK: HDRA - the Organic Organisation.

Helingo, Z., Liputo, S.A., & Limonu, M. (2021). Pengaruh penambahan tepung daun kelor terhadap kualitas roti dengan berbahan dasar tepung sukun. *Jambura Journal of Food Technology (JJFT)*, 3(2), 1-12.

Isnan, W., & Nurhaedah, M. (2017). Ragam manfaat tanaman kelor (*Moringa oleifera* Lamk.) bagi masyarakat. *Info Teknis Eboni*, 14(1), 63–75.

Iwansyah, A.C., Melanie, D., Cahyadi, W., Indraningsih, A.W., Khasanah, Y., Indriati A., Andriansyah, R.C.E., Hamid, H.A., & Yahya, I.H. (2022). Shelf life evaluation of formulated cookies from Hanjeli (*Coix lacryma-jobi* L.) and Moringa leaf flour (*Moringa oleifera*). *Food Bioscience*, 47. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101787.

Krisnadi, A.D. (2015). *Kelor Super Nutrisi*. Blora: Pusat informasi dan pengembangan tanaman kelor Indonesia. Retrieved from http://kelorina.com/ebook.pdf.

Kurniasih. (2013). *Khasiat dan Manfaat Daun Kelor.* Yogyakarta (ID): Pustaka Baru Press.

Mahmood K. T., Mugal, T., & Ul Haq, I. (2010). *Moringa oleifera*: a natural gift – A review. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 2(11), 775-781.

Malhotra, K. (2021). *Moringa: On Track For An Export Surge?.* Retrieved from https://www.tpci.in/indiabusinesstrade/blogs/moringa-on-track-for-an-export-surge/. Time, 30, Juni, 2022.

Malthus, T. (1798). *An Essay on the Principle of Population*. London: Electronic Scholarly Publishing Project. Retrieved from http://www.esp.org/books/malthus/population/malthus.pdf.

Mashamaite, C.V., Pieterse, P.J., Mothapo, P.N., & Phiri, E.E. (2021). *Moringa oleifera* in South Africa: a review on its production, growing conditions and consumption as a food source. *South African Journal of Science*, 117(3/4), 1-7. http://dx.doi.org/10.17159/sajs.2021/8689.

Mohammed, A.S., Lai, O.M., Muhammad, S.K.S., Long, K., & Ghazali, H.M. (2003). *Moringa oleifera*, potentially a new source of oleic acid-type oil for Malaysia. *Bioscience and Biotechnology*, 3, 137–140.

Mridha, M.A.U. (2015). Prospects of Moringa cultivation in Saudi Arabia. *Journal of Applied Environmentaland Biological Sciences,* 5, 39–46.

Mune-Mune, A.M., Nyobe, E.C., Bassogog, C.B., & Minka, S.R. (2016). A comparison on the nutritional quality of proteins from *Moringa oleifera* leaves and seeds. *Journal of Cogent Food & Agriculture*, 2, 1-8. https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1213618.

Nadeem, M., & Imran, M. (2016). Promising features of *Moringa oleifera* oil: recent updates and perspectives. *Journal of Lipids in Health and Diseae,* 15, 212–220.

Nambiar, V.S., Guin, P., Parnami, S., & Daniel, M. (2010). Impact of antioxidants from drumstick leaves on the lipid profile of hyperlipidemics. *Journal of Herbal Medicine Toxicology,* 4(1), 165-172.

Nahriana, Yahya, M., & Tawani, R. (2019). Development of green banana cake (pisang ijo) products using kelor leaf (*Moringa oleifera* Lam) as a food dye and flour substitute. *Journal of Physics,* 1244, 1-5. http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1244/1/012031.

Novita, Y., & Athaillah, T. (2022). Community perception of Moringa leaf noodles in Babul Makmur Village, simeulue barat district, simeulue regency. *Economit Journal: Scientific Journal of Accountancy, Management and Finance*, 2(1), 62-68. https://doi.org/10.33258/economit.v2i1.612.

Ogunsina, B.S., Cheruppanpullil, R., & Govardhan Singh, R.S. (2010). Physicochemical and functional properties of full-fat and defatted Moringa (*Moringa oeifera*) kernel flour. *International Journal of Food Science & Technology*, 45, 2433–2439.

Omotesho, K.F., Sola-Ojo, F.E., Fayeye, T.R., Babatunde, R.O., Otunola, G.A., & Aliyu, T.H. (2013). The potential of Moringa tree for poverty alleviation and rural development: a review of evidence on usage and efficacy. *International Journal of Development and Sustainability*, 2, 799-813.

Pereira, F.S.G., Galvao, C.C., Lima, V.F., Rocha, M.F.A., Schuler, A.R.P., Silva, V.L., & Filho, N.M.L. (2016). The versatility of the *Moringa oleifera* oil in sustainable applications. *Journal of Oilseeds and Fats Crips and Lipid (OCL)*, 23(6), 1-7. https://doi.org/10.1051/ocl/2016027.

Reinert, J. (2018). Mission Moringa: the miracle tree and its healing properties. *Journal of Wholife Wholeness and Wellness*, 24(4), https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26890.72642

Republik Indonesia. (2018). *Undang-Undang 18 tahun 2012 tentang Pangan*. Jakarta: Serikat Negara.

Ribaudo, G., Povolo, C., & Zagotto, G. (2019). Moringa oleifera Lam.: a rich source of phytoactives for the health of human being. *Studies in Natural Products Chemistry*, 62, 179-210. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64185-4.00005-8.

Srimiati S, & Agestika, L. (2022). Pengaruh substitusi daun kelor segar dan tepung daum kelor terhadap hasil uji organoleptic dan karakteristik proksimat *pudding*. *Amerta Nutrition,* 6(2), 164-172.Tumu.

Suhaemi, Z., Husmaini, Yerizal, E., & Yessirita, N. (2021). Pemanfaatan daun kelor (*Moringa oleifera*) dalam fortifkasi pembuatan *nugget*. *Jurnal Ilmu Produksi dan Teknologi Hasil Peternakan*, 9(1), 49-54. https://doi.org/10.29244/jipthp.9.1.49-54.

Teixeira, E.M., Carvalho, M.R., Neves, V.A., Silva, M.A., & Arantes-Pereira. L. (2014). Chemical characteristics and fractionation of proteins from Moringa oleifera Lam. leaves. *Journal of Food Chemistry,* 147(15), 51-54. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.135.

Villafuerte, L.R., & Villafurte-Abonal, L. (2009). *Moringa Malunggay Phillippines*. Manila: Apples of Gold Publishing.

Vongsak, B., Sithisarn, P., Mangmool, S. , Thongpraditchotec, S., Wongkrajang, Y., & Gritsanapan, W. (2013). Maximizing total phenolics, total flavonoids contents and antioxidant activity of *Moringa oleifera* leaf extract by the appropriate extraction method. *Industrial Crops and Products*, 44, 566-571. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.09.021.

Winarno, F.G. (2018). *Tanaman Kelor (Moringa oleifera), Nilai Gizi, Manfaat dan Potensi Usaha*, Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.

Zakaria, Salim, A., Rauf, S., & Rosmini. (2020). Karakteristik fisik, daya terima dan keamanan bubur instan dengan penambahan tepung daun kelor (*Moringa oleifera*) sebagai makanan pendamping ASI bayi umur 6-12 bulan. *Media Gizi Pangan*, 27(1), 131-139. https://doi.org/10.32382/mgp.v27i1.1519MEMINIMALKAN DAMPAK NEGATIF REVOLUSI HIJAU MELALUI PERTANIAN ORGANIK BERBASIS LIMBAH BIOMASSA KELAPA SAWIT DI PERKEBUNAN SAWIT PT. TEBO INDAH, JAMBI.

PENDIDIKAN KEWIRAUSAHAAN PRODUK PANGAN: STUDI KASUS DI PRODI TEKNOLOGI PANGAN UNIVERSITAS TERBUKA

FOOD ENTREPRENEURSHIP EDUCATION: A CASE STUDY IN FOOD TECHNOLOGY DEPARTMENT OF UNIVERSITAS TERBUKA

Adhi Susilo[1*], Sazli Tutur Risyahadi[2]

[1]Program Studi Teknologi Pangan, Jurusan Pertanian, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
[2]Departemen Ilmu Nutrisi dan Teknologi Pakan, Fakultas Peternakan, Institut Pertanian Bogor

*adhi@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Pendidikan kewirausahaan memiliki peran yang sangat penting dalam pengembangan sumber daya manusia di era masyarakat 5.0. Mata kuliah kewirausahaan produk pangan (PANG4417) untuk mahasiswa Prodi Teknologi Pangan didesain untuk dapat menciptakan dan mengembangkan foodpreneurship. Mahasiswa diharapkan mampu merencanakan langkah-langkah yang perlu disiapkan dalam mendirikan usaha bisnis pangan mulai dari aspek produksi, pemasaran, sumber daya manusia, keuangan serta manajemen resikonya. Analisis SWOT dilakukan untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang kekuatan, kelemahan, peluang, dan ancaman yang terlibat dalam proses belajar mengajar mata kuliah ini. Data dikumpulkan melalui teknik observasi, wawancara, dan dokumentasi; kemudian dianalisis secara deskriptif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendidikan kewirausahaan berbasis foodpreneurship memerlukan integrasi dan sinergi antara kewirausahaan dan akademik prodi/jurusan kedalam isi (materi), kegiatan, dan metode untuk membangun kompetensi kewirausahaan mahasiswa. Isi pendidikan jarak jauh kewirausahaan berupa materi yang disajikan, dibahas, dan dikembangkan dalam kegiatan, sedangkan kegiatan dan metodenya meliputi perkuliahan dalam jaringan (daring/online), pelatihan, pembinaan, dan inkubasi bisnis. Perkuliahan daring kewirausahaan untuk menciptakan kompetensi kewirausahaan

dasar (memiliki pola pikir dan kemampuan menciptakan pekerjaan), pelatihan dilaksanakan untuk menumbuhkan kompetensi kewirausahaan menengah (menyusun proposal kewirausahaan produk pangan yang layak), sedangkan pembinaan dan inkubasi bisnis untuk mengembangkan kompetensi kewirausahaan lanjut (menjalankan atau mengembangkan usaha). Tugas mata kuliah kewirausahaan produk pangan terdiri dari 2 unit. Mahasiswa membuat proposal kelayakan usaha produk pangan pada tugas pertama dan mengevaluasi hasil bisnis usaha produk pangan mereka pada tugas kedua.

Kata Kunci: *foodpreneurship, kewirausahaan mahasiswa, pendidikan kewirausahaan.*

ABSTRACT

Entrepreneurship education has a very important role in the development of human resources in the era of society 5.0. Food product entrepreneurship course (PANG4417) for Food Technology Study Program students is designed to be able to create and develop foodpreneurship. Students are expected to be able to plan the steps that need to be prepared in establishing a food business starting from aspects of production, marketing, human resources, finance and risk management. SWOT analysis was conducted to gain a better understanding of the strengths, weaknesses, opportunities, and threats involved in the teaching and learning process of this course. Data were collected through observation, interview, and documentation techniques; then analyzed descriptively. The results show that foodpreneurship-based entrepreneurship education requires integration and synergy between entrepreneurship and academic study programs/departments into the content (materials), activities, and methods to build student entrepreneurial competencies. The content of distance education for entrepreneurship is in the form of material that is presented, discussed, and developed in activities, while the activities and methods include online lectures, training, coaching, and business incubation. Entrepreneurship online lectures are to create basic entrepreneurial competencies (having the mindset and ability to create jobs), training is carried out to grow medium-sized entrepreneurial competencies (composing viable food product entrepreneurship proposals), while business coaching and incubation is to develop advanced entrepreneurial competencies.

Kata Kunci: *foodpreneurship, student entrepreneurships, entrepreneurship education.*

PENDAHULUAN

Pendidikan berperan penting dalam meningkatkan aktivitas kewirausahaan dan daya saingnya. Tingkat pendidikan diperlukan untuk mempromosikan daya saing seorang lulusan perguruan tinggi. Lembaga pendidikan dan pengajaran yang berkualitas akan membawa peningkatan yang signifikan terhadap pengetahuan, keterampilan, dan kompetensi anak didik yang diperlukan untuk meningkatkan daya saing ekonomi nasional (Mathis, 2011; Sahlberg & Oldroyd, 2010). Daya saing lulusan perguruan tinggi melalui pendidikan dapat membantu menciptakan inovasi dan adaptasi terhadap teknologi yang berimplikasi pada peningkatan pendapatan (Breton, 2013). Di era society 5.0 yang menuntut kemampuan manusia untuk dapat menyelaraskan antara kemajuan ekonomi dan teknologi dengan penyelesaian masalah sosial di masyarakat, membuat pendidikan berperan penting dalam pembangunan sumber daya manusia. Tanpa meningkatkan kualitas pendidikan, akan sulit bagi suatu negara untuk meningkatkan kinerja ekonominya dalam jangka panjang. Keterikatan konkret antara beberapa kegiatan seperti pendidikan, penciptaan lapangan kerja, dan kinerja kewirausahaan menegaskan pendapat bahwa pendidikan terhadap kegiatan kewirausahaan memang merupakan aspek vital (Raposo & do Paço, 2010).

Oleh karenanya pendidikan kewirausahaan mahasiswa perlu dikembangkan dalam satu sistem terintegrasi mulai dari tingkat prodi/jurusan hingga universitas serta unit-unit pendukungnya dengan melibatkan semua dosen, baik dosen kewirausahaan maupun dosen non-kewirausahaan. Untuk mendapat solusi tersebut, perlu desain pendidikan kewirausahaan produk pangan bagi mahasiswa di perguruan tinggi, khususnya di Universitas Terbuka. Melalui desain pendidikan kewirausahaan tersebut diharapkan jumlah mahasiswa yang memiliki kreativitas dan inovasi berdasarkan ilmu pengetahuan prodi/jurusannya dapat meningkat dan berkembang. Akhirnya produktivitas masyarakat lokal dan nasional dapat meningkat secara berkelanjutan dan lebih berdaya saing. Masalah yang perlu dipecahkan adalah bagaimana desain pendidikan kewirausahaan mahasiswa Universitas Terbuka yang dapat menciptakan dan atau mewujudkan serta mengembangkan foodpreneur mereka.

TINJAUAN PUSTAKA

Mengingat pentingnya kontribusi kewirausahaan terhadap sosial dan ekonomi masyarakat, pendidikan kewirausahaan merupakan instrumen kunci untuk meningkatkan sikap kewirausahaan calon pengusaha (Liñán et al., 2010). Meskipun demikian, keberadaan pendidikan kewirausahaan masih diperdebatkan. Peran pendidikan kewirausahaan memiliki dampak terhadap intensi berwirausaha (Fayolle & Gailly, 2013). Pendidikan kewirausahaan memiliki dampak yang signifikan terhadap trend dan keinginan mahasiswa untuk berwirausaha (Pittaway & Cope, 2007). Di sisi lain, hasil penelitian lain cenderung menegaskan sebaliknya bahwa pendidikan kewirausahaan memiliki dampak yang relatif kecil terhadap niat berwirausaha (Bae et al., 2014; Gouveia et al., 2012). Perbedaan latar belakang pendidikan tidak selalu berpengaruh langsung terhadap niat berwirausaha mahasiswa (Zhang et al., 2013).

Di tengah argumen yang saling bertentangan tentang dampak pendidikan kewirausahaan, perlu juga untuk mempelajari kegigihan program. Semakin tinggi tingkat pendidikan maka akan semakin lebar pula peluang keberhasilan wirausaha akan (Doh & McNeely, 2012). Individu yang memiliki pendidikan kewirausahaan yang tinggi akan memiliki intensi berwirausaha yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang tidak (Shirokova et al., 2017). Sedangkan individu yang terpapar pendidikan kewirausahaan tidak berpengaruh terhadap niat berwirausaha bahkan cenderung negatif (Oosterbeek et al., 2010). Pendek kata, tingkat pendidikan yang tinggi tidak memperkuat hubungan dengan keberhasilan berwirausaha (Purusottama & Trilaksono, 2019).

Menurut Center for Entrepreneurial Leadership Clearinghouse on Entrepreneurship Education, pendidikan kewirausahaan merupakan proses menyediakan konsep dan keterampilan bagi individu untuk mengenali peluang yang orang lain abaikan, dan untuk memiliki wawasan, harga diri dan pengetahuan untuk bertindak dimana orang lain ragu-ragu (Handrimurtjahjo, 2013). Lebih spesifik (Fayolle, 2009) mengemukakan pendidikan kewirausahaan sebagai aktivitas yang ditujukan untuk terjadinya proses kewirausahaan, yaitu mulai dari menumbuhkan pola pikir dan sikap serta keterampilan

kewirausahaan sehingga dapat membangkitkan ide/gagasan usaha, kemudian memulai usaha dan mengembangkannya melalui inovasi. Secara lebih rinci (Rasmussen, Moberg & Revsbech, 2015), mengungkapkan bahwa pendidikan kewirausahaan mencakup unsur isi, metode, dan aktivitas untuk pengembangan motivasi, kompetensi, dan pengalaman agar peserta dapat menerapkan, mengelola, dan berpartisipasi dalam proses pemberian nilai tambah. Dari pengertian pendidikan kewirausahaan yang dikemukakan di atas, dapat dirangkum bahwa pendidikan kewirausahaan adalah segenap isi, metode, dan aktivitas untuk mengembangkan pola pikir, sikap, motivasi, pengetahuan, keterampilan, serta pengalaman kewirausahaan, sehingga individu mampu menemukan ide/gagasan usaha untuk meraih peluang, memulai usaha, dan mengembangkan usaha yang dapat memberikan nilai tambah bagi dirinya dan atau orang lain. Pengertian tersebut menunjukkan bahwa pendidikan kewirausahaan memiliki cakupan: isi, metode, dan aktivitas. Cakupan tersebut ditujukan untuk memberikan/mengembangkan pengetahuan, pola pikir, sikap, motivasi, keterampilan, dan pengalaman kewirausahaan. Cakupan dan tujuan tersebut dimaksudkan untuk mendapatkan individu yang mampu menciptakan ide/gagasan usaha hingga mengembangkan usahanya bagi pemberian nilai tambah bagi dirinya dan atau orang lain.

Kewirausahaan jelas merupakan salah satu jenis program akademik yang dapat menghubungkan masalah sosial-ekonomi dan ekologi dan membangun keterampilan terapan untuk mengatasinya. Pendidikan kewirausahaan dapat dibagi menjadi dua jenis: pendidikan tentang kewirausahaan dan pendidikan untuk kewirausahaan (Lourenço et al., 2013). Yang pertama sebagian besar didorong oleh teori sedangkan yang kedua membekali siswa dengan kemampuan untuk menjadi wirausaha. Yang terakhir membutuhkan pendekatan pedagogis terapan yang membangun keterampilan kewirausahaan di mana proses 'melakukan' adalah pusat pengalaman belajar (Draycott & Rae, 2011; Lourenço & Jayawarna, 2011). Namun, pedagogi terapan tidak berarti mengabaikan metode pengajaran tradisional. Pendidikan kewirausahaan yang efektif harus menggunakan pendekatan pedagogis campuran yang mengacu pada metode tradisional dan terapan (Liñán & Fayolle, 2015; Lourenço et al., 2013).

Pendidikan kewirausahaan mengacu pada kumpulan ajaran formal yang menginformasikan, melatih dan mendidik peserta didik yang tertarik untuk mendirikan usaha atau pengembangan usaha kecil (Bechard & Toulouse, 1998). Pendidikan kewirausahaan juga dapat didefinisikan sebagai keterampilan yang dapat diajarkan dan karakteristik yang dapat dikembangkan untuk memungkinkan individu mengembangkan rencana baru dan inovatif (Jones & English, 2004). Sementara Yu Cheng, Sei Chan, & Mahmood (2009) menyebutkan bahwa pendidikan kewirausahaan secara tradisional didefinisikan secara sempit sebagai pendidikan yang memberikan keterampilan yang dibutuhkan untuk mendirikan bisnis baru dan mendefinisikan pendidikan kewirausahaan sebagai lebih dari manajemen bisnis atau memulai bisnis baru. Ini adalah tentang "belajar", pembelajaran yang mengintegrasikan pengalaman, keterampilan dan pengetahuan dan kesiapan untuk memulai usaha baru.

Pentingnya pendidikan kewirausahaan bagi masa depan perekonomian suatu bangsa telah banyak dipuji oleh para peneliti, misalnya Yu Cheng et al. (2009) dan McKeown et al. (2006). Dalam penelitiannya, pendidikan kewirausahaan lebih dari sekedar menciptakan usaha bisnis baru, tetapi juga menunjukkan pemahaman tentang esensi kewirausahaan seperti belajar menjadi inovatif, yaitu berpikir di luar kotak, kesiapan yang tinggi untuk berubah dan mampu mengintegrasikan dan mensintesis pengalaman, keterampilan dan pengetahuan untuk menciptakan, berinovasi, dan mengevaluasi peluang wirausaha berlimpah yang mereka dilatih untuk mengidentifikasi (Sendouwa et al., 2019).

Menurut Yu Cheng et al. (2009), pendidikan kewirausahaan membawa hasil penting bagi lulusan dan juga masyarakat dalam hal mendorong masyarakat secara keseluruhan untuk lebih responsif terhadap perubahan teknologi baru. Dalam penelitian mereka, Heinonen dan Poikkijoki (2006) juga melaporkan bahwa perilaku kewirausahaan adalah pendekatan inovatif yang merupakan platform yang layak untuk pembangunan ekonomi di masyarakat mana pun.

Kusuma dan Pramesti (2020) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui persepsi mahasiswa terhadap model pembelajaran kuantum yang digunakan pada mata kuliah kewirausahaan. Kesimpulan dari penelitian ini adalah model pembelajaran kuantum dapat meningkatkan keterampilan kewirausahaan siswa berdasarkan persepsi dan pengalaman mereka. Model pembelajaran ini memiliki ciri-ciri yang bersifat kesatuan. Hal ini terlihat dari persepsi siswa terhadap pelaksanaan pembelajaran. Persepsi siswa menjadi salah satu dasar untuk mengevaluasi pelaksanaan pembelajaran yang memberikan pengalaman berwirausaha sebagai pembekalan karakter foodpreneur kepada siswa. Sedangkan Viaggi et al. (2021) menyoroti perlunya akses yang fleksibel ke modul pembelajaran yang berisi campuran konsep teoretis dan pengalaman praktis. Ditambahkan juga perlunya proses kreasi bersama dan pembelajaran bersama untuk mengidentifikasi praktik yang sesuai untuk penggunaan teknologi digital yang inovatif.

Hasil penelitian Hermawan et al. (2021) menunjukkan bahwa pendidikan kewirausahaan dan *self-efficacy* (efikasi diri) berpengaruh terhadap minat berwirausaha mahasiswa di Jawa Barat yang pernah mengikuti pendidikan kewirausahaan. Orientasi kewirausahaan juga berpengaruh terhadap intensi berwirausaha, pendidikan kewirausahaan, efikasi diri, orientasi, dan intensi berpengaruh terhadap kompetensi kewirausahaan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Universitas Terbuka yang mencakup kegiatan kuliah kewirausahaan, dan kegiatan-kegiatan penunjang mata kuliah Kewirausahaan Produk Pangan (PANG4417). Responden penelitian yaitu pimpinan prodi, dosen pengampu mata kuliah kewirausahaan dan mahasiswa. Pengumpulan data dilakukan melalui teknik observasi, wawancara, dan dokumentasi. Observasi untuk mengumpulkan data tentang pelaksanaan perkuliahan dan kegiatan penunjang/pendukung kewirausahaan; wawancara digunakan untuk mengumpulkan data tentang kebijakan-kebijakan yang berkaitan dengan pendidikan kewirausahaan

dan pelaksanaannya; sedangkan dokumentasi digunakan untuk mengumpulkan data tentang hasil yang diperoleh dari kegiatan pendidikan kewirausahaan. Data penelitian dianalisis dengan menggunakan teknik analisis deskriptif baik kuantitatif maupun kualitatif.

PEMBAHASAN

Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi meluncurkan program kewirausahaan mahasiswa pada tahun 2009 untuk memfasilitasi mahasiswa yang tertarik untuk memulai bisnis di bidang sains, teknologi, dan seni (Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan Nasional, 2015). Pemerintah melalui Kementerian Koperasi dan UKM merencanakan 1 juta wirausahawan baru dalam 5 tahun (RPJM 2015-2020) untuk mengurangi pengangguran.

Keberadaan mata kuliah kewirausahaan dan pelaksanaan perkuliahannya di Universitas Terbuka sangat bervariasi dan sangat tergantung pada pimpinan jurusan/prodi untuk mengadakan/menerapkan mata kuliah kewirausahaan dalam kurikulumnya. Hal itu disebabkan oleh kebijakan universitas tentang mata kuliah Kewirausahaan yang telah berstatus sebagai mata kuliah wajib di seluruh program studi. Adanya mata kuliah Kewirausahaan dimaksudkan untuk menambah wawasan mahasiswa terhadap dunia kewirausahaan serta memotivasi mereka untuk ikut terlibat langsung dalam dunia wirausaha sebagai wirausahawan muda yang tangguh, sehingga mereka dapat ikut berkontribusi dalam meningkatkan perekonomian negara Indonesia. Mata kuliah kewirausahaan sesuai dengan rumusan sikap lulusan perguruan tinggi pada Peraturan Menteri Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2020 Tentang Standar Nasional Pendidikan Tinggi yaitu setiap lulusan program pendidikan akademik, vokasi, dan profesi harus memiliki sikap menginternalisasi semangat kemandirian, kejuangan, dan kewirausahaan. Mereka diharapkan memiliki bekal wawasan, pengetahuan, dan keterampilan yang cukup untuk berwirausaha selepas kuliah. Hal ini sesuai pendapat (Buchari, 2021), kewirausahaan tidak semata-mata muncul dari adanya bakat tetapi dapat dipelajari. Adanya kewirausahaan

menjadi mata kuliah Wajib, lebih jauh diharapkan akan meningkatkan kreativitas dan daya saing mahasiswa/lulusan supaya cepat menciptakan pekerjaan. Hal itu sesuai dengan salah satu fungsi pendidikan tinggi yaitu mengembangkan sivitas akademika yang inovatif, responsif, kreatif, terampil, berdaya saing, dan kooperatif (Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2012 Tentang Pendidikan Tinggi, 2012). Status mata kuliah kewirausahaan sebagai mata kuliah wajib juga membawa implikasi pada perbedaan isi mata kuliah. Mata kuliah kewirausahaan seharusnya tidak menitik beratkan atau fokus pada pemberian wawasan dan perubahan pola pikir mahasiswa ke arah kewirausahaan, tetapi harus membekali keterampilan kewirausahaan, sehingga harus ada praktik kewirausahaan walaupun hanya sekedar berjualan produk.

Matakuliah Kewirausahaan Produk Pangan (PANG4417) bertujuan agar mahasiswa memiliki kemampuan merancang penambahan nilai dari bahan pangan, menghasilkan produk pangan, hingga memasarkan produk tersebut. Mahasiswa diharapkan memiliki kemampuan berwirausaha yaitu kemampuan kreatif dan inovatif (*Create new and different*) untuk menciptakan nilai tambah barang/jasa berbasis pangan yang dilandasi dengan semangat penuh keberanian menghadapi risiko.

Mata kuliah ini disusun agar mahasiswa dapat melakukan kegiatan wirausaha di bidang pangan mulai menyusun ide usaha dibidang pangan, membuat produk pangan, membuat proposal kelayakan usaha produk pangan, hingga melakukan komunikasi dan negosiasi dalam memasarkan produk pangan. Pembahasan awal dimulai dengan menggali potensi dan karakter seorang wirausaha pada diri mahasiswa, mahasiswa dapat mempelajari karakter-karakter apa saja yang dibutuhkan untuk menjadi seorang wirausaha. Diteruskan dengan bagaimana menggali ide bisnis berbasis pangan. Pada kuliah daring mahasiswa diberikan pengetahuan tentang apa saja yang disiapkan untuk mendirikan usaha dimulai dari aspek produksi, pemasaran, sumberdaya, dan keuangan. Mahasiswa dapat menyusun proposal kelayakan usaha dan menyusun komunikasi dalam menjual produk pangan yang pada akhirnya akan dapat membuat produk pangan.

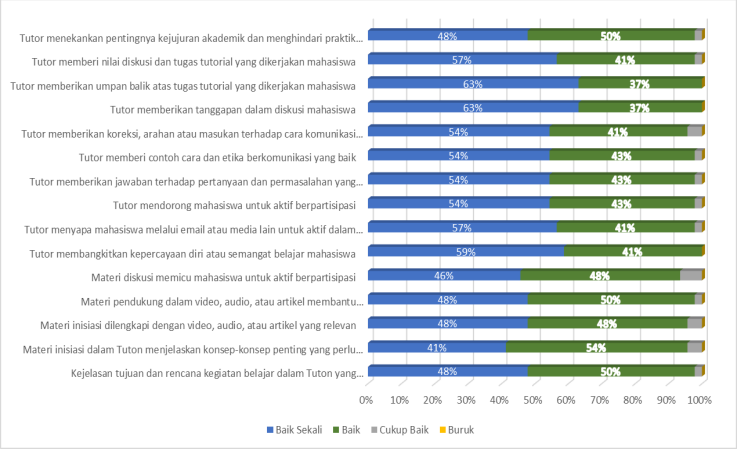
Pada setiap sesi pembelajaran, mahasiswa diberikan materi bahasan atau materi inisiasi yang dilengkapi dengan diskusi dan praktek mandiri pada setiap sesinya. Mahasiswa juga mendapatkan tugas praktik tuton (praton) sebanyak 2 kali dan harus dikerjakan karena berkontribusi terhadap nilai yang akan diperoleh. Tugas diberikan pada minggu ke-5, dan ke-7.

Materi yang dibahas pada tutorial online mata kuliah ini diantaranya:

a. Pertemuan Minggu ke-1: Pengantar Kewirausahaan
b. Pertemuan Minggu ke-2: Pengembangan Usaha Berbasis Pangan
c. Pertemuan Minggu ke-3: Strategi dan Perencanaan Usaha
d. Pertemuan Minggu ke-4: Perencanaan Produksi
e. Pertemuan Minggu ke-5: Perencanaan Pemasaran dan Penjualan
f. Pertemuan Minggu ke-6: Perencanaan Keuangan
g. Pertemuan Minggu ke-7: Penyusunan Proposal Kelayakan Usaha
h. Pertemuan Minggu ke-8: Komunikasi dan Negosiasi Bisnis

1. Survei Berbasis Kuesioner Kepuasan Mahasiswa

Untuk menilai kepuasan mahasiswa terhadap mata kuliah Kewirausahaan Produk Pangan (PANG4417) yang dilakukan secara daring melalui tutorial online (tuton), disiapkan survei berbasis angket dan mahasiswa diminta untuk memberikan pendapatnya dalam skala Likert 0-3, 0 (Buruk), 1 (Cukup Baik), 2 (Baik) dan 3 (Baik Sekali), tentang tingkat kepuasan umum pada mata kuliah PANG4417.



Gambar 1. Distribusi Frekuensi Respon Setiap Butir Evaluasi Tutor Tuton

Berdasarkan kuesioner online terhadap peserta tuton mata kuliah kewirausahaan produk pangan sebanyak 12 kelas dan per kelas tuton terdiri dari 15 mahasiswa yang dibimbing oleh 12 tutor, diperoleh 46 umpan balik dari mahasiswa. Secara umum tutor diapresiasi baik dan sangat baik oleh mahasiswa yang mencapai angka apresiasi lebih dari 90%. Apresiasi yang sangat baik diberikan pada indikator pemberian umpan balik pada diskusi dan tugas mahasiswa yang mencapai 63%. Distribusi frekuensi respons terhadap kuesioner, sebagai persentase, disajikan pada Gambar 1.

2. Analisis SWOT

Analisis SWOT dilakukan pada isi dan desain komponen mata kuliah dan disajikan pada Tabel 1, menyoroti bahwa mahasiswa memiliki kesempatan yang baik untuk berhubungan dan berinteraksi dengan mata pelajaran yang menarik dan dengan orang-orang yang dapat membantu mereka mengkonsolidasikan pengetahuan mereka dan menunjukkan hal dan peluang baru untuk pekerjaan mereka di masa depan. Hal ini dimungkinkan karena berbagai topik yang disajikan oleh para tutor membekali mahasiswa untuk melakukan praktek kewirausahaan produk pangan dengan lebih baik. Namun hasil

yang diinginkan tidak selalu tercapai karena siswa tidak memiliki cukup waktu untuk mengembangkan dan mengeksplorasi topik.

Tabel 1. Analisis SWOT

STRENGTHS ▪ Bahan ajar berisi topik-topik yang terbaru dan luas cakupannya ▪ Mahasiswa memiliki kesempatan melakukan praktek kewirausahaan produk pangan secara mandiri	**WEAKNESSES** ▪ Keterbatasan waktu untuk memperdalam topik ▪ Keterbatasan pembelajaran tatap muka antara dosen/ tutor dengan mahasiswa ▪ Keterbatasan dana untuk melakukan praktikum kewirausahaan produk pangan
OPPORTUNITIES ▪ Terbuka kesempatan untuk dosen dan mahasiswa mengeksplore topik-topik baru ▪ Terdapat kesempatan bagi mahasiswa dan dosen untuk bekerja sama dalam penelitian produk pangan	**THREATHS** ▪ Jaringan perusahaan pangan daerah yang belum matang, terbelakang dan dengan sumber daya yang terbatas ▪ Jaringan kerjasama praktikum belum merata

Interaksi antara mahasiswa dan dosen biasanya berlangsung singkat dan terbatas pada sesi tuton. Kendala lain adalah bahwa usaha makanan lokal yang ada di daerah mereka adalah usaha mikro umum dengan sumber daya yang terbatas dan kesulitan dalam menerima siswa dan memberi mereka kesempatan magang untuk mengimplementasikan ide-ide mereka. Namun demikian, dengan unit tutorial online ini para mahasiswa dan dosen terpapar pada ide-ide baru yang potensial. Itu juga dilihat sebagai peluang untuk membangun kemitraan baru untuk terlibat dalam proyek dengan dukungan keuangan untuk penelitian, pengembangan, dan inovasi baru

yang dapat mengarah pada proyek kewirausahaan produk pangan. Secara terperinci keunggulan dan kelemahan yang dimiliki pada pembelajaran jarak jauh yang sudah diterapkan sebagai berikut:

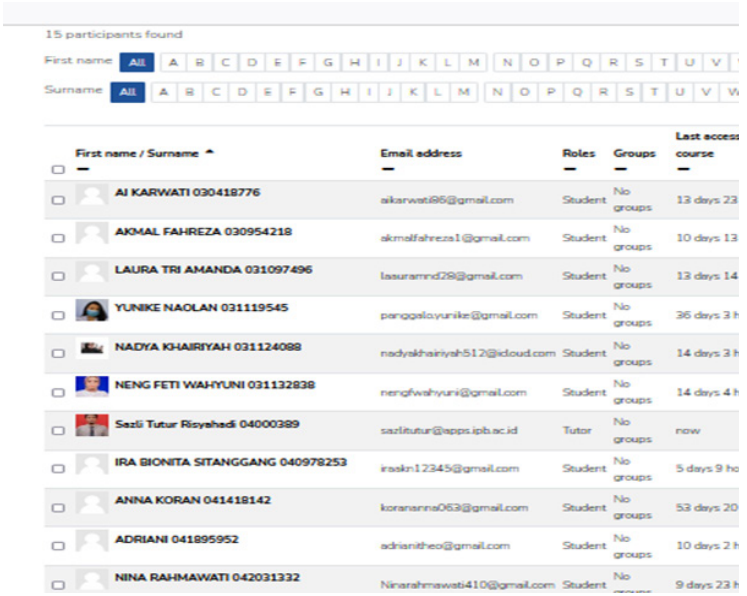
a. Keunggulan Pembelajaran Jarak Jauh PANG4417

Pembelajaran kewirausahaan PANG 4417 memiliki keunggulan utama dibandingkan matakuliah lainnya yaitu jumlah peserta per kelas yang tidak banyak, di tempatkan di semester akhir kurikulum program sarjana Teknologi Pangan, kegiatan webinar dan diskusi *coaching* intensif dan karakteristik keberagaman latar belakang peserta. Selain itu, kredit sks PANG4417 setara dengan 4 sks yang cenderung lebih tinggi dibandingkan Matakuliah lainnya.

1) Jumlah peserta yang optimal

   Peserta praktek online kewirausahaan produk pangan dirancang tidak melebihi 15 orang per kelasnya. Jumlah tersebut jauh lebih rendah dibandingkan mata kuliah lain yang dilaksanakan tutorial online. Adapun mata kuliah lain yang diajarkan secara tutorial online berkisar antara 50-60 orang per kelasnya. Semakin sedikit jumlah mahasiswa semakin fokus seorang tutor untuk mendampingi pembelajaran dan prakteknya. Dengan demikian para mahasiswa dapat berinteraksi lebih mudah dengan tutor terkait pengembangan usahanya. Interaksi ini menjadi penting mengingat usaha memerlukan coaching yang lebih intensif untuk memantau dan berdiskusi mengenai perkembangan usaha baik pengadaan bahan baku, proses produksi hingga penjualan. Seringkali setiap kegiatan tutorial online, beberapa mahasiswa sudah mempunyai pengalaman produksi dan menjual suatu produk pangan. namun demikian, Coaching diperlukan oleh mahasiswa baik sebagai pengusaha baru ataupun sudah berpengalaman. Tutor berperan sebagai coaching sehingga akan fokus pada perubahan mindset, seperti kemampuan menangkap peluang marketing online, kegigihan berusaha, keberanian untuk mencoba hal-hal baru serta mampu membangun hubungan baik dengan konsumen.

2) Mata kuliah ini dirancang diakhir sistem perkuliahan
Mahasiswa yang mengikuti PANG4417 sudah memahami berbagai aspek teknologi pangan karena sebelumnya telah menyelesaikan berbagai mata kuliah. Hal ini akan mendukung aktivitas kewirausahan yang dijalankannya. Sebagai contoh matakuliah Dasar-dasar Manajemen Untuk Industri Pangan (PANG4110) tentang konsep manajemen secara umum dan secara khusus membahas tentang keterampilan bagi manajer pada suatu usaha industri pangan. Seorang wirausahaan setidaknya harus mengetahui konsep manajerial yang baik untuk usahanya. Selain manajerial, aspek pengetahuan bahan pangan dan teknis pun sudah diberikan pada Matakuliah Pengetahuan Bahan Pangan (PANG4210), Pengantar Teknologi Pangan (PANG 4212) dan Prinsip Teknik Pangan (PANG 4215) sehingga memperkaya ide usaha yang akan dijalankan pada praktek online. Penerapan prinsip teknologi pangan pada usaha ini sangat penting untuk menciptakan nilai tambah suatu produksi sekaligus meningkatkan daya saing produk yang sedang diproduksi dengan produk-produk yang sudah ada di pasaran. Sebelum melaksanakan praton Kewirausahaan Pangan, dari sisi aspek ekonomi sudah diberikan melalui beberapa mata kuliah seperti Ekonomi Pangan (PANG 4224), Ekonomi Teknik (PANG 4321) dan Statistika Ekonomi (ESPA4123). Dengan demikian, peserta mahasiswa mampu merancang studi kelayakan usaha sebagai acuan jika ingin melibatkan mitra usaha yang lebih intensif. Berdasarkan hal tersebut, Matakuliah PANG 4417 dapat digunakan sebagai sarana penerapan ilmu pengetahuan dan teknologi pangan yang telah diperoleh sebelumnya. Gambar 2 berikut merupakan salah satu kelas online Kewirausahaan Produk Pangan yang tidak melebihi 15 orang (Gambar 2).

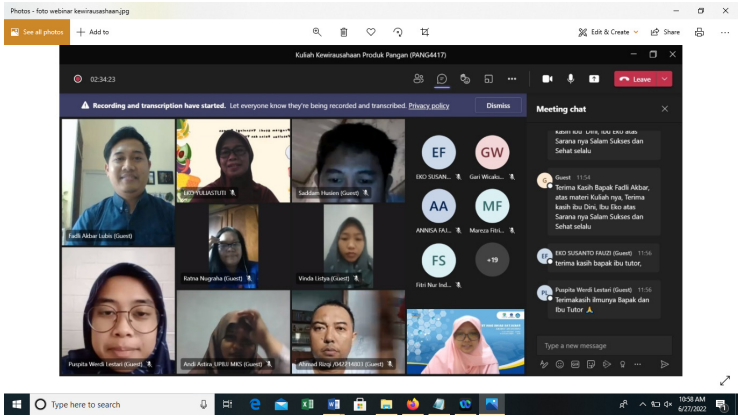


Gambar 2. Contoh Daftar Mahasiswa Per Kelas Tuton PANG4417

3) Webinar materi penunjang usaha untuk keseluruhan peserta

Selain melakukan praktek dengan produksi dan memasarkan langsung produknya, aktivitas tutorial kewirausahan lainnya yaitu melakukan webinar berseri terkait wirausaha di setiap akhir minggu. Kegiatannya lebih menekankan pada sharing pengalaman dan keahlian yang dimiliki para tutor. Topik-topiknya seperti penggalian ide usaha, strategi pemasaran produk, produksi bersih, kelayakan usaha sederhana hingga proses perizinan usaha. Dalam kesempatan ini, tutor dapat berperan sebagai mentor yang akan memberikan pandangan dan masukan positif, juga berbagi pengalaman praktis untuk mendukung kesuksesan bisnis mahasiswa. Disisi lain, para mahasiswa dapat membagikan pengalamannya kepada seluruh mahasiswa lain yang berasal dari kelas yang berbeda. Gambar 3 berikut merupakan salah satu

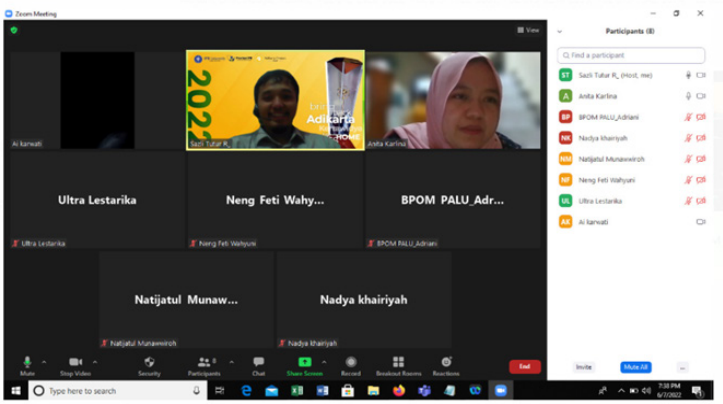
aktivitas webinar yang dihadiri tidak hanya mahasiswa tapi tutor-tutor, kaprodi dan fasilitator dari Program Studi Teknologi Pangan.



Gambar 3. Aktivitas Webinar MataKuliah PANG 4417

4) Diskusi di kelas tatap muka secara online

Aktivitas diskusi lebih personal kepada masing-masing mahasiswa, karena hanya dihadiri maksimum 15 orang disetiap kelas tutornya masing-masing dan setiap peserta dapat mencurahkan ide-ide usaha, permasalahan yang dihadapi hingga rencana teknis usaha langsung dengan tutornya. Kegiatan ini setidaknya dilakukan minimal 2-3 kali selama praktek tuton ini. Output yang diperoleh yaitu perserta lebih mengenal satu sama lain dan terciptanya peluang kerjasama antar mahasiswa serta saling mensarankan dan memotivasi jika ada masalah yang dihadapi. Pada kesempatan ini tutor lebih banyak berperan sebagai fasilitator bukan sebagai narasumber seperti pada kegiatan webinarnya. Gambar 4 berikut merupakan aktivitas diskusi dikelas tutor yang dihadiri oleh 9 mahasiswa. Penggunaan online meeting lebih disukai mengingat fleksibilitas tempat yang lebih tinggi dan jangkauannya yang lebih luas.



Gambar 4. Aktivitas Webinar MataKuliah PANG 4417

5) Tugas Dokumentasi kegiatan praktek
Untuk lebih meyakinkan bahwa praktek produksi dan pemasaran berlangsung dan dikerjakan oleh setiap mahasiswa, maka dalam tugas-tugas yang diberikan harus mensertakan dokumentasi baik berupa foto maupun video aktivitas produksi dan pemasaran. Hal ini sangat efektif untuk memotivasi mahasiswa dan penilaian tugas PANG4417 menjadi lebih objektif. Pada tugas 1 ditekankan mengenai proses produksi dan alasan mengapa memilih produk tersebut serta proses pemasaran baik melalui cara online maupun offline marketing. Pada tugas 2 lebih fokus pada penyusunan proposal usaha dan video rekaman persentasi usahanya. Dalam persentasi tersebut, mahasiswa seolah-olah berada didepan para calon investor atau calon mitra.

6) Pembentukan Grup Whatsapp (WA) antar peserta
Grup WA sebagai pelengkap elearning dapat digunakan sebagai sarana komunikasi dan diskusi yang lebih real time dan lebih efektif. Usaha yang dijalankan bersifat dinamis, sehingga interaksi yang cepat diperlukan dan tentu akan lebih mudah bila menggunakan aplikasi WA. Kedepan perlu ada integrasi website elearning UT dengan

grup WA atau merancang aplikasi android mobile yang bertujuan menghubungkan fitur diskusi Website elearning dengan perangkat ponsel peserta tuton yang lebih fleksibel.

7) Karakteristik latar belakang mahasiswa yang berbeda

Pendidikan jarak jauh dengan konsep praktek online akan mempengaruhi komposisi mahasiswa yang tidak hanya terkonsentrasi disuatu wilayah namun bisa mencakup seluruh Indonesia bahkan bisa sampai luar negeri. Disini akan ada sharing ide dan peluang yang terbuka besar untuk saling kolaborasi baik segi pemasaran maupun segi produksi Sebagai contoh produk rendang telur dari mahasiswa asal sumatera barat tidak banyak dijual di Jakarta padahal banyak mahasiswa berasal dari Jakarta yang berpotensi sebagai pemasar produk. Hal ini bisa memunculkan peluang produksi di Sumatera Barat dan berjualan di Jakarta dan tentunya adanya dukungan sistem logistik kurir yang sudah cukup mapan di Indonesia. Tidak hanya dari produk, bisa juga kerjasama pengadaan bahan baku eksotik diwilayah-wilayah Indonesia. Selain itu, ada juga kemungkinan untuk sharing cara produksi makanan disuatu wilayah yang tidak ada disuatu wilayah lainnya.

Pengalaman pekerjaan mahasiswa yang berbeda-beda menjadi keunggulan pembelajaran PANG 4417. Peserta mahasiswa Kewirausahaan Pangan berasal dari berbagai latar belakang yang tidak hanya lulusan SMA saja namun dari profesional karyawan yang sudah berpengalaman. Hal ini dapat mendukung dari segi produksi maupun pemasaran produk wirausahanya. Tidak jarang mahasiswa menjual produknya ke teman sekantornya sebagai target konsumen. Dari sisi produksi, ada beberapa yang sudah bekerja di industri pangan yang bisa menjelaskan aspek-aspek krusial dalam produksi pangan seperti sistem keamanan dan legalitas produk pangan. sebagai contoh salah satu mahasiswa bekerja di BPOM dapat menjelaskan kepada mahasiswa lainnya mengenai izin edar dan peluang sertifikasi halal serta pendampingan berkelanjutan. Dapat disimpulkan bahwa karakteristik mahasiswa yang berbeda akan

meningkatkan peluang kolaborasi terlebih di era VUCA (*Volatility, Uncertainty, Complex* dan *Ambigue*)yang cenderung membutuhkan kerjasama.

b. Kelemahan Pembelajaran Jarak Jauh PANG4417

Walaupun memiliki keunggulan, terdapat beberapa kelemahan yang menjadi tantangan pembelajaran jarak jauh kewirausahaan diantaranya adalah adanya mahasiswa kurang aktif, tutor tidak dapat merasakan langsung kesulitan produksi dan pemasaran, serta perhitungan keuangan pada analisis kelayakan usaha yang cukup rumit untuk usaha baru.

1) Adanya mahasiswa yang kurang aktif
   Kesibukan peserta karena kesulitan membagi waktu antara pekerjaan dan menjalankan usahanya. Hal ini karena memang mahasiswa sudah banyak yang bekerja diberbagai instansi. Salah satu cara mengatasinya yaitu tutor memotivasi dengan menjelaskan esensi meluangkan waktu dan pentingnya usaha pada saat pensiun nanti. Selain itu, mahasiswa diberi motivasi pentingnya bermitra sehingga tidak semua aktivitas usaha dikerjakan oleh mahasiswa tetapi berbagi dengan mitra. Kemampuan berkomunikasi serta bernegosiasi menjadi penting dalam menjual produk pangan.
2) Kendala coaching produksi dan pemasaran jarak jauh
   Seringkali dalam prakteknya, mahasiswa mendapatkan kesulitan dalam usaha baik produksi maupun pemasaran. Tutor tidak dapat merasakan langsung kesulitan tersebut sehingga saran yang diberikan hanya berdasarkan persentasi atau tugas akhir dari mahasiswa. Hal ini menyebabkan adanya potensi usaha produksi dan jualan sudah selesai namun masukan dan saran tutor belum dilaksanakan dengan baik. Untuk meminimaliasi hal tersebut, perlu ada komunikasi intensif setiap tahapan pengerjaan tugas yang setidaknya tugas terdiri dari perencanaan usaha, pelaksanaan usaha, pelaporan usaha serta penyusunan kelayakan usaha dari pengalaman yang sudah dilakukan.
3) Perhitungan keuangan untuk kelayakan usaha
   Untuk usaha yang masih baru, perhitungan ini cukup membuat mahasiswa kesulitan, namun demikian

mahasiswa sudah mampu menghitung pengeluaran dan pemasukan dari usaha yang sudah dijalankan. Perhitungan serta pembukuan keuangan sederhana masih perlu dikenalkan dan diajarkan oleh tutor. Peranan tutor yaitu memotivasi dan menjelaskan pentingnya pencatatan dan pemisahan keuangan keluarga dengan keuangan usaha. Perencanaan keuangan usaha yang baik dapat digunakan untuk berkomunikasi dan bernegosiasi dengan mitra.

3. Identifikasi Kendala yang Dihadapi oleh Mahasiswa dalam Memulai Usaha

Berdasarkan hasil observasi sebagai tutor PANG 4417 dan wawancara kepada seorang tutor lainnya telah ditemukan bahwa diawal perkuliahan terdapat beberapa kendala yang dihadapi mahasiswa saat akan memulai usaha untuk pertama kalinya, mahasiswa biasanya belum memiliki gambaran yang jelas tentang usahanya hanya sebatas ide umum. Menurutnya, tugas tutor memotivasi agar jangan mudah menyerah dan memastikan proses inkubasi usaha tetap berjalan minimal selama kegiatan tutorial online berlangsung. Berdasarkan hasil wawancara dengan Tutor PANG 4417, berikut ini adalah beberapa kendala yang dihadapi mahasiswa dan solusi yang ada pada pembelajaran di PANG 4417.

a. Kebingungan memilih bisnis yang tepat

Kebingungan memilih bisnis yang akan dijalankan, hal ini merupakan salah satu yang paling umum dirasakan mahasiswa sebagai calon wirausahaan pemula. Banyak mahasiswa memilih usaha produk pangan yang sedang tren yang cenderung bersifat musiman. Hal-hal seperti ini bisa membuat mahasiswa kesulitan dalam menentukan usaha yang tepat untuk dijalani. Mata kuliah PANG4417 memberikan beberapa solusi untuk mengatasi kendala ini diantaranya adalah

1) Mahasiswa diminta membuat daftar asset-asset yang dimiliki dan mengkategorikannya sebagai asset produktif atau konsumtif.
2) Berdasarkan kategori asset yang dimiliki, mahasiswa diminta untuk membuat daftar pilihan alternatif 10 jenis usaha berbasis pangan yang potensial dan alasannya,

kemudian memdiskusikannya dengan tutor dan mahasiswa lainnya didalam kelas untuk menentukan pilihan yang tepat.

3) Mahasiswa disarankan untuk memilih bisnis yang sesuai dengan minat dan kemampuan, sehingga lebih mudah untuk memulai dan mengelolanya dengan cara yang tepat.

4) Dalam pemilihaannya mahasiswa dapat menggunakan teknik pengambilan keputusan multikriteria dengan pertimbangan banyak hal seperti potensi pasar, sarana produksi, biaya yang diperlukan dan lainnya.

Solusi dari tutor tersebut sejalan dengan Bae et al. (2014) yang menyatakan terdapat hubungan cukup signifikan antara pendidikan kewirausahaan dengan keinginan melakukan wirausaha. Solusi tersebut merupakan bagian dari pendidikan kewirausahaan produk pangan (PANG4417) sehingga mampu mengurangi kebingungan memilih bisnis yang tepat dan pada akhirnya dapat meningkatkan keinginan berwirausaha.

b. Takut mengalami kegagalan

Berdasarkan wawancara dengan tutor, menemukan bahwa terdapat kendala yang dihadapi oleh mahasiswa diawal pembelajaran yaitu ketakutan mengalami kegagalan. Selain itu, disampaikan oleh tutor bahwa mahasiswa merasa sudah mengeluarkan waktu dan juga uang dalam melaksanakan pembelajaran. PANG 4417 dirancang agar mahasiswa dapat mengelola berbagai risiko dengan cara yang tepat, sehingga kegagalan tidak perlu dialami ketika menjalankan bisnis. Berikut beberapa aktivitas PANG 4417 untuk mengurangi rasa takut mengalami kegagalan yang disampaikan oleh Tutor MK Kewirausahaan pangan.

1) Tutor disetiap sesi selalu memotivasi untuk selalu berpikir positif dan tenang, agar bisa memulai bisnis sesuai dengan rencana yang telah dibuat.

2) Mahasiswa berdiskusi dengan tutor dan mahasiswa lainnya untuk merancang strategi usaha dan menentukan titik kritis yang paling perlu diperhatikan agar usaha mahasiswa terus berkembang. Jika sudah ada perencanaan maka ketakutan akan berkurang.

Solusi-solusi tersebut mendukung untuk meningkat keberanian dalam wirausaha. hal ini senada dengan (Liñán et al., 2010) yang menyampaikan bahwa sikap pribadi dan kontrol perilaku adalah faktor yang paling relevan dalam menjelaskan keberanian berwirausaha.

c. Tidak punya modal bisnis

Kendala berikutnya yang ditemukan dari hasil wawancara dengan tutor yaitu tidak punya modal bisnis. Ide usaha yang besar tentu akan membutuhkan modal yang banyak, sehingga sulit untuk direalisasikan oleh mahasiswa sebagai pengusaha pemula. Dalam pembelajaran PANG 4417 diberikan beberapa alternatif solusi sebagai berikut.

1) Dalam prakteknya, mahasiswa diminta untuk memulai dari bisnis yang paling mungkin dilakukan dengan sumberdaya yang ada pengalaman memiliki usaha menjadi tujuan utama selama pembelajaran kewirausahaan. Kepemilikan skala usaha yang besar belum menjadi target utama dalam pembelajaran PANG 4417.
2) Jika mahasiswa memerlukan modal tambahan dalam peningkatan skala usaha, mahasiswa dimotivasi oleh tutor untuk mencari mitra potensial dengan mempersentasikan keberhasilan pengalamannya pada usaha skala kecil yang sudah dilaksanakan. Tutor membantu berdiskusi dengan mahasiswa dalam penyusunan kelayakan usaha sebagai tugas dari PANG4417 serta membuat video persentasi yang akan diberikan pada calon investor.

Solusi yang dberikan dalam pembelajaran PANG 4417 dengan usaha skala kecil dan bermitra sejalan dengan kajian (Lourenço, 2013) yang menyatakan bahwa pembelajaran perlu dukungan kewirausahaan lintas stakeholders program termasuk dengan mahasiswa lain yang non-bisnis. Faktor keterbatasan modal yang menghambat dapat dilakukan integrasi yang efektif dari program kewirausahaan yang diselenggarakan dengan mitra lain.

d. Tidak percaya diri dan merasa tidak mampu

Hasil dari wawancara dan diskusi dengan tutor menunjukkan bahwa pada masa awal pembelajaran PANG 4417, beberapa mahasiswa belum memiliki kemampuan dalam mengelola bisnis atau bahkan merencanakannya.

1) Mahasiswa diminta mengikuti Webinar serial setiap akhir sesi dan berdiskusi dengan tutor lebih intensif untuk meningkatkan kemampuan teknis dalam melakukan wirausaha.
2) Mahasiswa menceritakan secara singkat autobiografinya, pengalaman yang berkesan yang membentuk keperbadian serta kelebihan dan kekurangan pada diri mahasiswa. Dengan melakukan hal tersebut dapat mengidentifikasi karakter seorang wirausahawan yang ada pada diri mahasiswa sehingga meningkatkan rasa percaya diri.
3) Mahasiswa menyusun rencana produksi baik pengadaan bahan baku, penjadwalan produksi, dan flowchart produksi dan rencana pemasaran produk pangan yang akan dibuat. Kemudian mendiskusikannya dengan tutor sehingga dengan saran dan masukan tutor membuat lebih percaya diri terhadap usaha yang akan dijalankan.

Solusi PANG 4417 untuk meningkatkan kepercayaan diri dalam berwirausaha melalui pendidikan kewirausahaan meliputi diskusi intensif baik dalam forum maupun dengan tutor, mengidentikasi karakter yang dimiliki dan mempelajari pembuatan rencana teknis usaha. Solusi tersebut senada dengan (Draycott & Rae, 2011) bahwa Pembelajaran wirausaha adalah proses eksplorasi, atau perjalanan, di mana nilai pembelajarannya dilihat melalui siswa mengalami dan merenungkan proses, bergerak dari akademik ke dunia luar dalam berbagai cara baik secara fisik dan digital.

KESIMPULAN

Pendidikan kewirausahaan produk pangan diartikan sebagai integrasi dan sinergi dari isi, aktivitas, dan metode untuk mengembangkan wawasan, pola pikir, sikap, motivasi, pengetahuan, keterampilan, serta pengalaman kewirausahaan produk pangan, sehingga individu mampu menemukan ide/ gagasan usaha untuk meraih peluang, memulai usaha, dan mengembangkan usaha yang dapat memberikan nilai tambah produk pangan bagi dirinya dan atau orang lain. Proses belajar mengajar mata kuliah Kewirausahaan Produk Pangan (PANG4417) secara daring pada umumnya diapresiasi secara sangat baik oleh mahasiswa. Walaupun memiliki berbagai keunggulan, masih ada beberapa kelemahan sebagai tantangan untuk perbaikan pembelajaran berikutnya. Proses pembelajaran melalui praton secara umum sudah memadai untuk mengantarkan mahasiswa dalam lingkup Prodi Teknologi Pangan Universitas Terbuka agar mampu melakukan kegiatan wirausaha di bidang pangan, menyusun ide usaha dibidang pangan, membuat produk pangan, membuat proposal kelayakan usaha produk pangan, hingga melakukan komunikasi dan negosiasi dalam memasarkan produk pangan. Luaran dari praktek kewirausahaan produk pangan mampu menumbuhkan minat dan jiwa kewirausahaan mahasiswa. Hal ini dibuktikan dengan mahasiswa yang masih melanjutkan usaha produk pangannya walaupun proses pembelajaran sudah selesai..

DAFTAR PUSTAKA

Bae, T. J., Qian, S., Miao, C., & Fiet, J. O. (2014). The Relationship between Entrepreneurship Education and Entrepreneurial Intentions: A Meta–Analytic Review. *Entrepreneurship Theory and Practice*, *38*(2), 217-254. https://doi.org/10.1111/etap.12095.

Bechard, J.-P., & Toulouse, J.-M. (1998). Validation of a didactic model for the analysis of training objectives in entrepreneurship. *Journal of Business Venturing*, *13*(4), 317-332. https://doi.org/10.1016/s0883-9026(98)80006-2.

Breton, T. R. (2013). The role of education in economic growth: theory, history and current returns. *Educational Research*, *55*(2), 121-138. https://doi.org/10.1080/00131881.2013.801241.

Buchari, A. (2021). *Kewirausahaan*. Alfabeta.

Doh, S., & McNeely, C. L. (2012). A multi-dimensional perspective on social capital and economic development: an exploratory analysis. *The Annals of Regional Science*, *49*(3), 821-843. https://doi.org/10.1007/s00168-011-0449-1.

Draycott, M., & Rae, D. (2011). Enterprise education in schools and the role of competency frameworks. *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, *17*(2), 127-145. https://doi.org/10.1108/13552551111114905.

Fayolle, A., & Gailly, B. (2013). The Impact of Entrepreneurship Education on Entrepreneurial Attitudes and Intention: Hysteresis and Persistence. *Journal of Small Business Management*, *53*(1), 75-93. https://doi.org/10.1111/jsbm.12065.

Gouveia, R., Dinis, A., do, A., Ferreira, J., & Raposo, M. (2012). The Effect of an Entrepreneurial Training Programme on Entrepreneurial Traits and Intention of Secondary Students. In *Entrepreneurship - Born, Made and Educated*: InTech.

Handrimurtjahjo, A.D. (2013). Model Pembelajaran Kewirausahaan di Perguruan Tinggi. *Jurnal Universitas Paramadina*, 10(23). 729-755. Retrieved from https://journal.paramadina.ac.id/index.php/upm/article/view/69.

H.E.Sendouwa, R., L.Lonto, A., & J.R.Saroinsong, S. (2019). Entrepreneurship Development Program in the Higher Education in Indonesia. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, *8*(2S9), 1006-1010. https://doi.org/10.35940/ijrte.b1022.0982s919.

Heinonen, J., & Poikkijoki, S. A. (2006). An entrepreneurial-directed approach to entrepreneurship education: mission impossible? *Journal of Management Development*, *25*(1), 80-94. https://doi.org/10.1108/02621710610637981.

Hermawan, Y., Disman, D., Ahman, E., Suwatno, & Sundari, R. (2021). *The Effect of Entrepreneurship Education, Self-Efficacy, and Orientation Toward Entrepreneurship Intention and Its' Implication on Entrepreneurship Competence*.

Jones, C., & English, J. (2004). A contemporary approach to entrepreneurship education. *Education + Training*, *46*(8/9), 416-423. https://doi.org/10.1108/00400910410569533.

Kusuma, A. I., & Pramesti, D. (2020). *Students Perception about Entrepreneurship Course Using Quantum Learning Model* Proceedings of the 5th Progressive and Fun Education International Conference (PFEIC 2020), http://dx.doi.org/10.2991/assehr.k.201015.003.

Liñán, F., & Fayolle, A. (2015). A systematic literature review on entrepreneurial intentions: citation, thematic analyses, and research agenda. *International Entrepreneurship and Management Journal*, *11*(4), 907-933. https://doi.org/10.1007/s11365-015-0356-5.

Liñán, F., Rodríguez-Cohard, J. C., & Rueda-Cantuche, J. M. (2010). Factors affecting entrepreneurial intention levels: a role for education. *International Entrepreneurship and Management Journal*, *7*(2), 195-218. https://doi.org/10.1007/s11365-010-0154-z.

Lourenço, F., & Jayawarna, D. (2011). Enterprise education: the effect of creativity on training outcomes. *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, *17*(3), 224-244. https://doi.org/10.1108/13552551111130691.

Lourenço, F., Taylor, T. G., & Taylor, D. W. (2013). Integrating "education for entrepreneurship" in multiple faculties in "half-the-time" to enhance graduate entrepreneurship. *Journal of Small Business and Enterprise Development*, *20*(3), 503-525. https://doi.org/10.1108/jsbed-04-2013-0052.

Mathis, W. J. (2011). Is Education the Key to Global Economic Competitiveness? *The Teacher Educator*, *46*(2), 89-97. https://doi.org/10.1080/08878730.2011.555637.

McKeown, J., Millman, C., Reddy Sursani, S., Smith, K., & Martin, L. M. (2006). Graduate entrepreneurship education in the United Kingdom. *Education + Training*, *48*(8/9), 597-613. https://doi.org/10.1108/00400910610710038.

Oosterbeek, H., van Praag, M., & Ijsselstein, A. (2010). The impact of entrepreneurship education on entrepreneurship skills and motivation. *European Economic Review*, *54*(3), 442-454. https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2009.08.002.

Pittaway, L., & Cope, J. (2007). Entrepreneurship Education. *International Small Business Journal: Researching Entrepreneurship*, *25*(5), 479-510. https://doi.org/10.1177/0266242607080656.

Purusottama, A., & Trilaksono, T. (2019). The presence and persistence of entrepreneurship education In Indonesia: a cross sectional study. *International Journal of Evaluation and Research in Education (IJERE)*, *8*(1), 71. https://doi.org/10.11591/ijere.v8i1.16528.

Raposo, M., & do Paço, A. (2010). Special issue: entrepreneurship and education—links between education and entrepreneurial activity. *International Entrepreneurship and Management Journal*, *7*(2), 143-144. https://doi.org/10.1007/s11365-010-0152-1.

Rasmussen, A., & Moberg, K.S., & Jensen, C.R. (2015). A Taxonomy of Entrepreneurship Education – perspectives on goals, teaching, and evaluation. The Danish Foundation for Entrepreneurship.

Sahlberg, P., & Oldroyd, D. (2010). Pedagogy for Economic Competitiveness and Sustainable Development. *European Journal of Education*, *45*(2), 280-299. https://doi.org/10.1111/j.1465-3435.2010.01429.x.

Shirokova, G., Laskovaia, A., & Beliaeva, T. (2017). Entrepreneurial learning and entrepreneurial intentions: a cross-cultural study of university students. *European J. of International Management*, *11*(5), 606. https://doi.org/10.1504/ejim.2017.10007649.

Viaggi, D., Barrera, C., Castelló, M. L., & Rosa, M. D. (2021). Education for innovation and entrepreneurship in the food system: the Erasmus+ BoostEdu approach and results. *Current Opinion in Food ….* https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214799321001004.

Yu Cheng, M., Sei Chan, W., & Mahmood, A. (2009). The effectiveness of entrepreneurship education in Malaysia. *Education + Training*, *51*(7), 555-566. https://doi.org/10.1108/00400910910992754.

Zhang, Y., Duysters, G., & Cloodt, M. (2013). The role of entrepreneurship education as a predictor of university students' entrepreneurial intention. *International Entrepreneurship and Management Journal*, *10*(3), 623-641. https://doi.org/10.1007/s11365-012-0246-z.

KONSERVASI LAHAN BEKAS GALIAN C UNTUK LAHAN PERTANIAN

CONSERVATION OF SAND PITS FOR CULTIVATED LAND

Nurmala Pangaribuan[1]*, Sri Maulidia Permatasari[2]

[1]Program Studi Agribisnis, Jurusan Pertanian, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
[2]Program Studi Statistika, Jurusan MIPA, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

*nurmala@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Upaya pemulihan lahan bekas tambang merupakan salah satu inovasi pemanfaatan lahan suboptimal dalam mencukupi kebutuhan pangan akibat jumlah penduduk yang terus meningkat. Lahan galian C menimbulkan masalah pada lingkungan hidup. Alih fungsi lahan pertanian menjadi Galian C, menjadikan lahan tidak produktif. Galian C, akan mengikis lapisan humus tanah yang kaya bahan organik, kerusakan topografi, fisiografi, morfologi, struktur, dan profil tanah, yang berdampak negatif terhadap lingkungan. Pada lahan bekas galian C, populasi mikroba tanah, bahan organik, dan kelembaban tanah sangat rendah. Di samping itu hara makro tidak tersedia, terjadi pemadatan tanah, akibatnya tumbuh kembang tanaman terganggu. Sand pits dikelola dengan tindakan konservasi tanah. Konservasi bertujuan untuk perbaikan sifat fisik, kimia dan biologi tanah yang terdegradasi. Selanjutnya dapat dimanfaatkan sebagai media tanam. Pendekatan dalam pengelolaan lahan bekas tambang adalah mengadopsi teknologi ramah lingkungan, revegetasi, fitoremediasi, pemberian bahan organik dan mikro organisme tanah. Konservasi lahan bekas galian C, diharapkan mampu menurunkan lahan kritis di Indonesia. Konservasi lahan bekas galian C, diharapkan mampu meningkatkan ketersediaan lahan yang favorable sebagai lahan pertanian yang mendukung pemenuhan kebutuhan pangan.

Kata kunci: *konservasi lahan, lahan bekas galian C, lahan pertanian*

ABSTRACT

Restoration of ex-mining land is one of the innovations in suboptimal land use in meeting food needs due to the increasing population. Sand pits, causes environmental problems. The conversion of cultivated land into Sand pits, makes the land unproductive. Sand pits will erode the humus layer of soil rich organic matter, damage topography, physiography, morphology, structure, and soil profile, which has a negative impact on the environment. In Sand pits has low in the population of soil microbes, organic matter, and soil moisture. In addition, macronutrients are not available, soil compaction occurs resulting in disturbed plant growth. Sand pits area can be managed with soil conservation measures, aimed at improving the physical, chemical and biological properties of the degraded soil. It is hoped that Sand pits can be used as planting medium. The approach to managing ex-mining land is to adopt environmentally friendly technologies, namely: revegetation, phytoremediation, application of organic matter, and soil micro-organisms. Conservation Sand pits, one of the efforts to increase the availability of favorable land as cultivated land.

Keywords*: land conservation, sand pits, agricultural land.*

PENDAHULUAN

Kebutuhan lahan pertanian semakin bertambah, seiring dengan pertambahan kebutuhan pangan dan peningkatan jumlah penduduk. Sementara lahan kritis, terlantar semakin bertambah luas dengan semakin intensif alih fungsi lahan. Perkembangan pertambangan, berdampak pada berkurangnya lahan pertanian. Pertambangan menyumbang penurunan kualitas lahan pertanian. Pasca pertambangan akan menambah luasan lahan kritis yang kemudian menjadi lahan terlantar. Guna memanfaatkan kembali untuk kegiatan pertanian, lahan bekas tambang harus dipulihkan. Lahan yang sudah mengalami degradasi berat, harus dilakukan reklamasi, rehabilitasi agar tanaman dapat tumbuh, dan berkembang. Saat ini penurunan kualitas fisik, kimia, dan biologi tanah oleh kegiatan penambangan yang tidak berorientasi kepada lingkungan, menjadi masalah utama. Hal ini karena kegiatan penambangan menyebabkan. 1) lahan kritis bertambah, 2) lahan pertanian yang subur semakin berkurang dan, 3) kebijakan pemerintah untuk ketahanan pangan yang berdaulat tidak tercapai. Oleh karena itu, jika lahan pasca tambang akan digunakan untuk komoditas pertanian, maka sifat fisik, kimia, dan biologi harus diperbaiki.

Galian C merupakan penambangan terbuka (*open-pit-mining*). Akibat kegiatan penambangan sudah berlangsung lama (bertahun-tahun), menyebabkan lahan menjadi sangat terdegradasi. Topografi, fisiografi dan morpologi lahan berubah, terbentuk lubang-lubang bekas tambang, ekologi, hidrologi terganggu. Bahkan dapat mengakibatkan pergeseran mata pencaharian penduduk. Semua bentuk limbah sisa hasil tambang seperti pasir, batuan, menjadi faktor pembatas untuk memanfaatkan lahan bekas galian menjadi lahan pertanian. Tanah menjadi gundul; akibatnya akan mempercepat peluruhan/erosi tanah lapisan atas/*top soil*, dan penurunan populasi mikroorganisme tanah. Perubahan struktur fisik tanah, dan kesuburan tanah, menyebabkan tanah menjadi tidak subur. Lahan bekas galian C, harus segera dikelola, agar lahan kritis tidak semakin meluas. Pasca penambangan selain meninggalkan kerusakan lingkungan tanah, perairan, flora dan fauna, juga menyebabkan terjadi pencemaran udara (Ghose,

2004; Sheoran, Sheoran, & Poonia, 2010). Pengelolaan lahan bekas tambang dapat dilakukan melalui konservasi tanah yang bertujuan untuk mencegah erosi, aliran permukaan, dan memulihkan kualitas tanah. Pemulihan kualitas tanah bekas tambang dilakukan melalui upaya revegetasi dengan tanaman awal (pionir), menggunakan mikroorganisme tanah, dan bahan organik berupa kompos.

PEMBAHASAN

1. Lahan Bekas Galian C

Sesuai UU No 11 Tahun 1967, bahan galian diklasifikasi menjadi 3 (tiga) golongan. Golongan A merupakan galian strategis yakni galian minyak bumi, gas alam, dan batubara. Golongan B merupakan galian kelompok vital, misalnya galian besi, dan tembaga. Golongan C terdiri dari galian pasir, kerikil, atau marmer. Kegiatan pertambangan umumnya menimbulkan kerusakan lingkungan hidup. Pengelolaan lingkungan di wilayah pasca pertambangan suatu keniscayaan, agar hubungan manusia dengan lingkungan selaras. Sumber daya dimanfaatkan secara terkendali dan bijak (*wise*). Manusia menjaga lingkungan agar kondisinya stabil, sustain, dan lestari demi mencapai pembangunan manusia Indonesia seutuhnya.

a. Karakteristik Fisik Tanah pada Lahan Bekas Galian C

Salah satu ciri areal bekas tambang adalah lahan tanpa vegetasi, bentuk permukaan tidak beraturan, saluran drainase mengalami kerusakan dan permukaan tanah mengandung bahan galian (*overburden*) yang mudah mengalami erosi oleh pukulan butir hujan langsung atau karena aliran permukaan. Erosi akan merusak lapisan atas tanah akibat terjadi pelepasan bahan organik.

Karakteristik tanah bekas tambang galian C, berupa pasir dengan ukuran yang beragam, lahan bersifat terbuka tanpa vegetasi. Pada lahan ini, terjadi perubahan morfologi dan topografi yang dapat mengubah iklim mikro, kecepatan angin, dan gangguan habitat flora maupun fauna (Utami, 2009; Pangaribuan, Hidayat, & Rachmawati, 2021). Berikut adalah gambaran umum dari lahan bekas tambang galian C yang berada di Tasikmalaya Jawa Barat dan di Karangasem Bali.

Sumber: Nugraha, 2019

Gambar 1. Lahan Galian C di Tasikmalaya

Sumber: Tribun Bali, 2017

Gambar 2. Lahan Galian C di Karangasem

1) Struktur Tanah

Tanah pasca galian C di Sumedang Jawa Barat memiliki kandungan pasir > 61 %, debu > 12 %, dan liat > 13%, masuk kategori lempung berpasir. Kandungan pasir tinggi sehingga mudah meloloskan air dan unsur hara yang dibutuhkan tanaman. Kandungan nutrisi pada tanah bekas galian C tergolong rendah dengan kandungan C organik 0,35%-0,86%, N total 0,05%-0,10%, P tersedia 14 ppm-15 ppm (Hidayat, Liberty, Rachmawati, & Utami, 2018; Pangaribuan, Hidayat, & Rachmawati, 2020). Penurunan kualitas tanah lapisan atas (*top soil*) pada lahan bekas tambang ditandai dengan kerusakan struktur tanah. Porositas tanah sebelum ada penambangan 43,69% dan setelah penambangan 44,95%. Sebagai perbandingan, komposisi pasir, debu, liat dan pH pada lahan kebun: pasir 6,62%, debu 67,1%, liat 26,28 % dan pH 6-7,25; sedangkan pada lahan kritis: pasir 56,26%, debu 2,75%, liat 18,99% dan pH < 6 (Wirawan, 2016).

Pembukaan lahan tambang dimulai dengan pembuatan jalan masuk, pembersihan lahan (*land clearing*) dengan menyingkirkan dan menghilangkan penutup lahan berupa tumbuhan perdu dan pohon-pohon, dilanjutkan dengan penggalian dan pengupasan tanah bagian atas (*top soil*). Setelah itu dilakukan pengupasan batuan penutup (*overburden*). Kedalaman penggalian tergantung pada keberadaan bahan tambang. Proses tersebut secara nyata akan mengubah bentuk

topografi dari lahan yang semula berbukit menjadi datar, terbentuk lubang besar dan dalam. Semua tahapan penggalian berpotensi menimbulkan kerusakan lahan.

Tanah lapisan atas (*top soil*) umumnya mengandung bahan organik yang sangat dibutuhkan tanaman untuk pertumbuhan dan perkembangan perakaran. Kehilangan lapisan ini dapat menurunkan produktifitas tanah sebesar 40% (Sheoran, Sheoran, & Poonia, 2010). Pasca penambangan galian C terjadi pengikisan lapisan atas tanah (*top soil*), terjadi proses pencucian akibat erosi, pemadatan tanah, penurunan pH tanah, akumulasi logam berat, penipisan bahan organik, penurunan kadar hara tanaman, penurunan KTK tanah, penurunan aktivitas dan jumlah mikroba, penurunan daya serap/permeabilitas tanah, penurunan produktivitas tanah, dan perubahan iklim mikro. Lahan pasca galian C akan kehilangan lapisan atas tanah (*top soil*) yang relatif lebih subur dan meninggalkan lapisan bawah tanah (*sub soil*) yang kurang subur (Ghose, 2005).

2) Bobot Isi Tanah (Bulk Density)

Lahan bekas galian C akan meninggalkan lapisan atas tanah yang terbuka, heterogen, memiliki bobot isi tanah (*bulk density*) tinggi, total pori rendah, dan peka terhadap erosi maupun aliran permukaan. Pada tanah yang produktif, bobot isi (BD) antara 1,1-1,5 g cm^{-3}, sedangkan bobot isi pada tanah bekas galian C di kedalaman efektif perakaran (*top soil*) cukup tinggi yakni 1,91 g cm^{-3} (Ghose, 2005; Erfandi, 2017). Kepadatan tanah merupakan salah satu faktor pembatas bagi pertumbuhan tanaman. Lahan bekas galian C, BD > 1,7 g cm^{-3}, tanah padat, pada kedalaman perakaran efektif (< 60 cm) mengandung batuan yang dangkal dan besar-besar, tanaman tidak mampu memperpanjang akar, air tidak tersedia bagi tanaman, dan rentan kekeringan berkepanjangan. Zulkarnain, Joy, Tuhpawana, & Prawira (2014), melaporkan bahwa pembukaan lapisan tanah atas setebal 10-80 cm pada lahan bekas galian C, menyebabkan erosi tanah sebesar 4,97 t ha^{-1} dengan toleransi kehilangan tanah sebesar 5,3 t ha^{-1}. Apabila tanpa lapisan atas atau proses reklamasi tanah buruk selama 9 bulan, dapat menyebabkan erosi tanah sebesar 102 t ha^{-1} $tahun^{-1}$, dengan toleransi kehilangan tanah sebesar 51 t ha^{-1} $tahun^{-1}$.

b. Kesuburan Tanah Bekas Galian C

Kesuburan tanah bekas galian C dapat diindikasikan dari kadar C-organik, pH tanah dan keberadaan mikroorganisma tanah.

1) C-Organik

Siregar, Sumono, & Munir (2013) melaporkan bahwa kegiatan penambangan bauksit cenderung merusak lapisan atas tanah (*top soil*) sampai ke *sub soil*. Air digunakan untuk memisahkan tanah dan bauksit, akibatnya C-organik ikut larut dan terjadi penurunan kandungan C-organik tanah. Kandungan bahan organik tanah yang ditunjukkan oleh nilai C-organik tanah mempengaruhi sifat fisik, kimia dan biologi tanah. Bahan organik tanah berperan dalam menentukan keberhasilan budidaya tanaman. Dekomposisi bahan organik tanah oleh mikroorganisme tanah akan membebaskan senyawa N dan senyawa asam/basa lainnya. Kegiatan penambangan atau pembakaran sisa-sisa tumbuhan dapat menurunkan jumlah N dan C serta unsur lainnya.

Kecukupan bahan organik akan menentukan interaksi komponen abiotik dan biotik pada ekosistem tanah. Kapasitas tukar kation tanah (KTK) erat hubungannya dengan kandungan bahan organik tanah (Siregar, Sumono, & Munir, 2013). Barek (2013) mendapatkan dari hasil penelitiannya, pada ekosistem hutan primer pada kedalaman ≤ 10 cm, KTK lebih tinggi dibanding kedalaman 10-20 cm. Proses dekomposisi bahan organik oleh aktivitas mikroorganisme tanah akan menghasilkan humus. Humus akan meningkatkan nilai KTK tanah. Oleh karena KTK tanah pada lahan galian C rendah, maka proses penyerapan unsur hara relatif rendah dan unsur-unsur hara mudah tercuci, hilang oleh infiltrasi atau melalui perkolasi.

Pada lahan galian C, tanah bagian atas (*overburden)* memiliki kadar C-organik rendah berkisar antara 0,35-0,85%; dan ketersediaan Fe, Mn, Cu, dan Zn juga rendah (Ghose, 2005). Pada lahan bekas tambang bauksit, kesuburan tanah sangat rendah (Sembiring, 2008). Santi (2015) mendapatkan dari hasil penelitiannya, pada pasir tailing timah, kandungan bahan organik hanya berkisar antara 0,1-0,2%, masuk kategori sangat rendah. Demikian juga halnya dengan unsur hara makro N, P, dan K, juga rendah. Hal ini berkaitan dengan proses pencucian pada

lapisan atas tanah melalui aliran permukaan dan kandungan bahan organik pada pasir pada lahan bekas galian C rendah sehingga lapisan atas tanah yang ditutupi oleh bahan limbah bekas galian C mengandung bahan organik rendah, sangat tidak efektif untuk pertumbuhan tanaman (Santi, 2015).

2) pH tanah

Proses pencucian melalui erosi pada lahan bekas galian C menyebabkan pH, KTK, ketersediaan unsur hara P dan kandungan humus tanah rendah. Hal ini berdampak negatif pada suplai ketersediaan P. Bila hal ini berlangsung lama, maka: 1) bahan organik tanah menjadi rendah, 2) ketersediaan P terhambat, dan 3) Al dan Fe oksida meningkat. Baik Al maupun Fe akan mengikat P, sehingga ketersediaan P rendah. Ghose (2005) melaporkan bahwa pada lahan bekas tambang batubara, bila lapisan mineral pirit (FeS_2) teroksidasi, akan terbentuk H_2SO_4, yang menyebabkan pH akan turun secara drastis. Apabila di tanah ini mengandung senyawa karbonat ($CaCO_3$ atau $MgCO_3$), maka proses pelapukan dan pelarutan senyawa karbonat dapat menaikkan pH. Tetapi bila senyawa karbonat yang ada di lahan ini tidak mengalami proses pelapukan, maka akumulasi senyawa pirit meningkat dan pH tanah menurun secara cepat. Pada kondisi tanah masam (pH < 5), unsur logam dalam kondisi beracun (Maiti, 2003). Pada tanah tailing timah, kisaran pH 2,7-4,75, berada pada kondisi sangat masam sampai masam (Santi, 2015). Tingkat kemasaman (pH tanah) yang cocok untuk tanaman legume, hijauan dan hortikultura berkisar antara 6,0-7,5 (Sheoran, Sheoran, & Poonia, 2010). Apabila tanah bekas galian C akan dijadikan sebagai media tanam, maka pH tanahnya harus dinaikkan.

c. Aktivitas Mikroorganisme Tanah pada Lahan Bekas Galian C

Pasca galian C, lahan tidak bervegetasi menyebabkan bahan organik tanah rendah dan aktivitas mikroorganisme tanah menurun (Ghose, 2005). Pada hal Bahan organik tanah dapat meningkatkan pertumbuhan dan aktivitas Fungi Mikoriza Arbuscular (FMA). Menurut Vidya, Suparman, & Karjo (2015), FMA dapat memanfaatkan bahan organik untuk merangsang pertumbuhan dan aktivitas hifa, sporulasi dan merubah kondisi

fisik dan kimia tanah menjadi lebih baik. Selain itu, dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme tanah dapat melepaskan hara ke dalam tanah. Proses dekomposisi bahan organik dapat menyebabkan N menjadi tersedia bagi tanaman karena N total tanah meningkat. Hal ini juga yang menyebabkan tanah menjadi lebih subur.

2. Konservasi Tanah pada Lahan Pasca Galian C

Lahan pasca galian C harus direhabilitasi agar dapat dimanfaatkan sebagai lahan pertanian. Rehabilitasi tanah merupakan upaya memulihkan, mempertahankan, dan meningkatkan fungsi lahan untuk meningkatkan daya dukung, produktivitas dan peranannya dalam menjaga sistem penyangga kehidupan. Rehabilitasi lahan bekas tambang antara lain dapat dilakukan melalui terasering dan revegetasi.

a. Terasering

Terasering merupakan salah satu upaya rehabilitasi lahan dengan cara meletakkan tanaman dengan sistem bertingkat-tingkat yang berfungsi untuk menahan aliran permukaan dan memperbesar peluang penyerapan air tanah. Jha dan Kapat (2009) menyatakan bahwa ada berbagai jenis erosi yang disebabkan oleh kegiatan penambangan di Indonesia, antara lain: erosi parit, erosi permukaan, erosi alur, dan erosi oleh percikan hujan. Pembuatan teras-teras merupakan alternatif untuk pencegahan atau pengurangan erosi tanah. Terasering ini merupakan metode tradisional, terbaik dan efektif untuk konservasi tanah dan air. Di Indonesia laju erosi pada lahan pertanian yang terletak pada kemiringan 3-30% tergolong tinggi, berkisar antara 60-625 t ha^{-1} $tahun^{-1}$ (Sutrisno & Heryani, 2013). Terasering merupakan metode yang efektif untuk diterapkan di lahan dengan kemiringan 5-40% (Permentan, 2006).

Pada penerapan terasering, teras-teras harus dilengkapi dengan saluran pembuangan air agar bahan organik yang diberikan tidak mengalir keluar. Terasering yang dianjurkan berupa guludan atau tangga/bangku. Tindakan terasering diawali dengan pembuatan strip dengan rumput, tanaman pagar, atau menyusun/menumpuk batuan yang disusun mengikuti garis kontur yang disesuaikan dengan kemiringan

lahan. Upaya ini dapat menahan aliran sedimen bekas tambang dan mengurangi dampak negatif akibat erosi parit (Jha & Kapat, 2009).

b. Revegetasi

Revegetasi merupakan salah satu metode konservasi lahan untuk pengembalian kesuburan tanah yang diawali dengan mengidentifikasi jenis tumbuhan yang mampu hidup. Tujuannya untuk mempermudah dan mempercepat proses perbaikan lahan. Keberhasilan upaya revegetasi ditentukan oleh masa penambangan dan jenis vegetasi. Oktavia (2019) melaporkan bahwa revegetasi lahan bekas tambang yang dilakukan PT. Bukit Asam (Persero) Tbk telah berlangsung selama 20 tahun. Sebelum dilakukan revegetasi, tanah timbunan yang ada di daerah tersebut bertekstur liat, berbatu dengan kandungan hara rendah. Setelah dilakukan rehabilitasi, lapisan serasah dan humus menjadi cukup tebal.

Rehabilitasi pada lahan pasca tambang dapat dilakukan menggunakan tumbuhan dari jenis non-pohon, seperti rumput-rumputan/padi-padian (*Poaceae*), Kirinyuh (*Euphatorium inulifolium kunth*), Kembang Telang (*Clitoria ternate*), Polong-polongan (*Fabacea*), Kayu Putih (*Eucalyptus globulus*), Kihujan (*Samanea saman*), dan lain-lain. Hermawan (2011) menyatakan bahwa perubahan sifat tanah pada lahan bekas galian C yang direvegetasi antara lain:

1) pH tanah. Pada lahan yang direvegetasi selama 20 tahun, pH tanah 6.00-6.55; dan pada lahan yang direvegetasi selama 12 tahun, pH tanah 6.00-6.18.
2) Kelembaban tanah. Kelembaban tanah pada lahan alami sekitar 43,51%, sedangkan kelembaban tanah pada lahan non-revegetasi 25,3%.
3) Suhu tanah. Suhu tanah pada lahan non-revegetasi 34,12°C, suhu terendah pada lahan alami 26,4°C.
4) Bobot kering serasah. Bobot kering serasah di lahan yang direvegetasi tertinggi 223,75 g dan di lahan non-revegetasi terendah 13,75 g.
5) Kandungan C-organik tanah dan N-total tanah. Pada lahan yang direvegetasi, kandungan C-organik tanah sebesar 6,22% dan N-total tanah sebesar 0,49%.

6) Tingkat kepadatan tanah. Pada lahan bekas tambang yang telah direklamasi selama 12 tahun, tingkat kepadatan tanah relatif sesuai untuk pertumbuhan tanaman pangan.

3. Pemanfaatan Lahan Bekas Galian C untuk Budidaya Perikanan

Perairan di lahan pasca galian C umumnya bersifat miskin unsur hara, kualitas air jelek, serta memiliki kandungan logam berat tinggi. Teknologi fitoremediasi dapat digunakan untuk merekayasa kualitas air di lahan pasca galian C agar perairan sesuai untuk budidaya perikanan. Fitoremediasi perairan dapat dilakukan melalui budidaya perikanan dengan sistim Keramba Jaring Apung atau menggunakan tanaman air seperti Eceng Gondok.

a. Fitoremediasi dengan Keramba Jaring Apung (KJA)

Keramba Jaring Apung (KJA) merupakan salah satu wadah untuk budidaya ikan. Kegiatan budidaya ikan melalui KJA dapat dilakukan di waduk atau perairan dengan sistem intensif. Semua jenis ikan laut dan ikan air tawar dapat dipelihara melalui sistim KJA. KJA memberikan harapan bagi upaya pemanfaatan lahan bekas galian C di Kecamatan Pasir Sakti, Kabupaten Lampung Timur dengan cara memanfaatkan danau bekas galian pasir untuk kegiatan budidaya ikan (Yudha, Diantari, & Hasani, 2021). Pemanfaatan lahan bekas galian C untuk budidaya perikanan telah memberikan peluang usaha baru bagi masyarakat sekitarnya. Hal ini pernah dilakukan di lahan bekas galian pasir di Desa Pagelaran, Kecamatan Ciomas untuk budidaya ikan air tawar.

b. Fitoremediasi Menggunakan Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*)

Fitoremediasi pada perairan lahan pasca tambang dapat menggunakan tanaman Eceng Gondok karena tanaman Eceng Gondok dapat: 1) menyerap besi (Fe) (Rezania, Taib, Din, Dahalan, & Kamyab, 2016; Syahputra, 2018); 2) mereduksi logam berat Fe, Ca, Mg, Cl, SO_4, PO_4 dan merkuri (Hg) (Rondonuwu, 2014). Eceng gondok mampu menurunkan konsentrasi Fe hingga 98% (Rezania, Taib, Din, Dahalan, & Kamyab, 2016), dan menurunkan

konsentrasi Fe dan Mn pada air di lahan bekas galian C sebesar 88,98% (Herniwanti, Priatmadi, Yanuwiadi, & Soemarno, 2014). Eceng gondok dapat berfungsi sebagai Bio Akumulator logam.

Sood, Uniyal, Prasana, & Ahluwalia (2012) menyatakan bahwa *Azolla pinnata* juga dapat menurunkan konsentrasi logam berat Hg dan Cd sebesar 70-94% pada lahan bekas tambang. Pengaplikasian 1383 mg berat kering *Azolla pinnata* per kg tanah, hasilnya ternyata dapat menurunkan konsentrasi Pb di air sebesar 83%. Hasil penelitian Herniwanti, Priatmadi, Yanuwiadi, & Soemarno (2014) juga mendapatkan bahwa *Azolla pinnata* mampu mereduksi timbal (Pb).

Salvinia molesta (Kiambang) juga terbukti efektif menurunkan konsentrasi logam Fe hingga 0.02% (di bawah ambang batas WHO) setelah diaplikasikan selama 21 hari. Fitoremediasi dengan tanaman air dan menambahkan bahan organik (biochar jerami padi) secara bersamaan dapat mereduksi Fe. Metode fitoremediasi menggunakan tanaman air dapat mereduksi Fe setelah 21 hari. Namun jika metode ini juga dilakukan dengan menambahkan bahan organik, maka reduksi Fe dapat diperpendek menjadi 6-9 hari. Metode Fitoremediasi menggunakan *Azollla sp.* dapat diandalkan untuk mereduksi kandungan logam berat Fe, Hg, dan Pb pada air di lahan bekas galian pasir.

4. Pemanfaatan Lahan Bekas Galian C untuk Budidaya Tanaman

Selain untuk budidaya perikanan, dengan perlakukan khusus, lahan bekas galian C dapat digunakan untuk budidaya tanaman. Budidaya tanaman di lahan pasca galian C dapat dilakukan dengan menambahkan bahan organik atau mengaplikasikan mikroorganisme.

a. Budidaya Tanaman dengan Menambahkan Bahan Organik (Kompos)

Pangaribuan, Hidayat, & Rachmawati (2020) melakukan penelitian dengan menggunakan tanah bekas galian C sebagai media tanam cabai (*Capsicum frutescens L*). Pada media tanam diberikan kompos Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) dan Paitan (*Tithonia diversifolia*). Hasil penelitiannya menunjukkkan suhu tanah dan kelembaban tanah yang diberi kompos Eceng

Gondok dan Paitan dengan dosis 15 t ha^{-1} menyebabkan temperatur tanah relatif lebih rendah (24,59^{0}C) dan kelembaban tanah lebih tinggi (93%). Eceng Gondok bersifat spons (memiliki daya serap air tinggi). Pada tanah bekas galian C yang terdapat di Bandung Barat, pemberian kompos Eceng Gondok dapat membantu menurunkan suhu tanah dan menjaga kelembaban tanah yang *favorable* bagi tanaman cabai.

Tanah bekas galian C termasuk tanah lempung dengan kandungan pasir tinggi. Tanah ini tidak layak sebagai media tanam karena mudah melepaskan air. Kandungan nutrisi tanah ini tergolong rendah: C organik 0,35%-0,86%, N total 0,05%-0,10%, dan P tersedia 14 ppm-15 ppm (Hidayat, Liberty, Rachmawati, & Utami, 2018; Pangaribuan, Hidayat, & Rachmawati, 2020). Yulnafatmawita, Adrinal, & Daulay (2008) pada hasil penelitiannya mendapatkan bahan organik asal gulma Eceng Gondok dan Kipait mampu meningkatkan kandungan bahan organik dan memperbaiki kualitas tanah. Kipait dapat menambah bahan organik tanah lebih cepat. Aplikasinya selama 3 bulan dapat meningkatkan prosentase agregat tanah dan indeks kemantapan agregat tanah. Penambahan bahan organik yang berasal dari Eceng Gondok dan Paitan mampu menurunkan bobot isi tanah yang semula hanya 1,25 g cm^{-3} menjadi 0,75 g cm^{-3} (Eceng gondok) dan 0,83 g cm^{-3} (Paitan) (Pangaribuan, Hidayat, & Rachmawati, 2020; Nurbaity, Hidayat, Huduya, & Sauman, 2013).

Pemberian bahan organik pada tanah bekas galian C menyebabkan perbaikan sifat fisik tanah: bobot isi tanah rendah, tingkat kepadatan tanah rendah, porositas tanah tinggi, tanah mudah menyerap air, dan permeabilitas tanah besar sehingga air mudah diteruskan ke akar tanaman. Perbaikan sifat fisik tanah ini menyebabkan pertumbuhan dan perkembangan akar tanaman cabai menjadi lebih baik. Hal ini mengindikasikan bahwa bahan organik dapat mengkonservasi lahan bekas galian C (Bronick & Lal, 2005). Lebih jauh Cooperband (2002) melaporkan bahwa bahan organik merupakan kunci bagi kesehatan tanah yang ditunjukkan oleh ketersediaan air meningkat, kepekaan terhadap erosi menurun, dan pemadatan tanah menurun. Penambahan bahan organik juga dapat meningkatkan kapasitas tanah menahan air. Kadar bahan organik 3-5% pada lahan bekas galian C dapat menjamin ketersediaan lahan pertanian baru.

b. Budidaya Tanaman dengan Aplikasi Mikroorganisme

Pengaplikasian Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) dan Bakteri Pelarut Fosfat (BPF) secara bersamaan pada media tanam bekas galian C dengan tanaman cabai sebagai tanaman indikator mampu menurunkan suhu tanah (24,37^{0}C), meningkatkan kelembaban tanah (93%) dan tanaman cabai dapat tumbuh dan berkembang dengan baik. Mikroba FMA menyebabkan persentase kelembaban tanah cukup tinggi, sedangkan mikroba BPF dapat mengeluarkan senyawa eksopolisakarida. Senyawa ini mampu merekatkan koloid tanah, meningkatkan daya pegang air tanah, dan menurunkan suhu tanah (23,37^{0}C) (Nurbaity, Yuniarti, & Sungkono, 2017; Hidayat, Liberty, Rachmawati, & Utami, 2018). Pangaribuan, Hidayat, & Rachmawati (2020) mendapatkan dari hasil penelitiannya bahwa pengaplikasian mikroorganisma FMA dengan dosis 10 g polibag^{-1} menyebabkan pertumbuhan tanaman cabai lebih tinggi dibandingkan tanaman kontrol (tanpa FMA). Pada tanah bekas galian C yang diaplikasikan dengan pemberian bahan organik (pupuk kandang) dan FMA, dapat meningkatkan pertumbuhan bibit buah naga (Nurbaity, Yuniarti, & Sungkono, 2017). Aplikasi FMA (*Glomus versiforme*) ditambah bahan organik (kompos Kipait) mampu meningkatkan produksi pipilan kering jagung. Produksi jagung meningkat 40-80% dibanding kontrol (Eddiwal, Saidi, Farda, & Rasyidin, 2018). Prayudyaningsih & Sari (2016) mendapatkan dari hasil penelitiannya, pengaplikasian FMA dan kompos mampu meningkatkan vigor bibit jati di lahan bekas tambang kapur. Penggunaan FMA dan bahan organik mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah; dan mampu meningkatkan kandungan nutrisi dalam tanah, dan penyerapan nutrisi oleh tanaman sehingga tanaman dapat tumbuh dengan optimal.

Hasil penelitian Hidayat, Liberty, Rachmawati, & Utami (2018) menunjukkan FMA jenis *Glomus* sp dapat membantu pembentukan agregat makro. Hifa eksternal yang panjang 30 m g tanah^{-1} mampu mengikat partikel tanah. Ukuran hifa eksternal lebih kecil (2 µm- 20 µm) dibanding ukuran akar (300 µm) menyebabkan hifa eksternal mampu menerobos pori mikro tanah. Hifa eksternal dapat menyerap unsur hara dan air pada pori mikro dan mengantarkannya ke tanaman (Smith & Smith, 2011). Hifa dapat mempercepat serapan unsur

hara tanah, meningkatkan agregasi tanah bekas galian C, dan mensekresikan glikoprotein yang disebut glomalin yakni bahan seperti lem yang akan merekatkan partikel tanah. Bahan organik menjadi sumber makanan bagi FMA agar dapat beraktivitas. Bertambahnya jumlah bahan organik, menyebabkan mikroba dapat berasosiasi pada berbagai tanaman budidaya melalui peningkatan aktivitas FMA.

Roni, Witariadi, Candraasih, & Siti (2013) melaporkan bahwa Bakteri Pelarut Fosfat (BPF) mampu meningkatkan serapan N dan P tanaman kudzu tropika, di lahan bekas galian C. Bakteri ini mampu mengeluarkan senyawa eksopolisakarida yang dapat dimanfaatkan sebagai *glue soil* untuk meningkatkan pH, KTK, C organik, N, P, dan K di samping dapat menstabilkan agregat tanah. Aplikasi BPF pada tanah bekas galian C dapat menurunkan suhu tanah sampai 23,37 ^{0}C. Senyawa eksopolisakarida yang dihasilkan BPF mampu merekatkan koloid tanah yang dapat menyebabkan daya pegang air tanah lebih tinggi dan temperatur tanah menjadi turun (Pangaribuan, Hidayat, & Rachmawati, 2021).

Sinergisme antara bahan organik berat asal dari tanaman Gamal (*Gliricidia sepium)*, dosis 30 t ha^{-1} dan mikroorganisme tanah, dapat mengurangi kepadatan tanah dan meningkatkan porositas tanah. Sinergisme bahan organik dan FMA secara bersamaan merupakan jurus ampuh untuk mengkonservasi tanah (Hidayat, Liberty, Rachmawati, & Utami, 2018).

KESIMPULAN

Beberapa kendala utama lahan bekas galian C adalah tanahnya tidak subur dan miskin bahan organik; kandungan hara, nilai KTK dan populasi mikroorganisme tanah juga rendah. Pada tanah bekas galian C, pH 4,04-5,20, bulk density > 1,7-1,91, kadar bahan organik 0,35-0,85%, dan kandungan liat tinggi (73,50-74,30%). Lahan bekas galian C dapat diberdayakan melalui upaya konservasi lahan melalui terasering, revegetasi, fitoremediasi, pembudidayaaan ikan, dan pembudidayaan tanaman pertanian. Pengaplikasian bahan organik pada tanah bekas galian C dapat meningkatkan kandungan nutrisi dan penyerapan nutrisi oleh tanaman sehingga tanaman dapat tumbuh dan berkembang dengan baik.

Lahan yang terdegradasi akibat kegiatan penambangan atau penggalian, harus ditata kembali. Tanah bekas galian C dapat digunakan sebagai lahan budidaya tanaman melalui pemberian perlakuan yang tepat. Inovasi dalam pemanfaatan lahan suboptimal perlu terus dilakukan, untuk menambah luasan lahan produktif penghasil pangan.

DAFTAR PUSTAKA

Barek. (2013). Sifat Kimia Tanah Pada Berbagai Tipe Penggunaan Lahan di Desa Leboni Kecamatan Pamona Puselembo Kabupaten Poso (Skripsi). Palu: Universitas Tadulako.

Bronick, C. J., & Lal. R. (2005). Soil Structure and Management: A Review. *Geoderma* 124, 3-22.

Cooperband, L. (2002). Building Soil Organic Matter with Organic Amendments with Organic Amendments. Center for Integrated Agricultural Systems.

Eddiwal, E., Saidi, A., Farda, E., & Rasyidin, A. (2018). Pengaruh Inokulasi Fungi Mikoriza Arbuskula (Fma) Plus Organik terhadap Pertumbuhan dan Produksi Jagung Pada Ultisol. *J. Solum*, 15 (2).

Erfandi, D. (2017). Pengelolaan Lansekap Lahan Bekas Tambang: Pemulihan Lahan dengan Pemanfaatan Sumberdaya Lokal (In-Situ) Balai Penelitian Tanah. Bogor: Kampus Penelitian Pertanian.

Ghose, M.K. (2004). Effect of opencast mining on soil fertility. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 63, 1006-1009.

Ghose, M.K. (2005). Soil conservation for rehabilitation and revegetation of mine-degraded land. *TIDEE–TERI Information Digest on Energy and Environment,* 4(2), 137-150.

Hidayat, C., Liberty., Rachmawati, Y.S., & Utami, E.P. (2018). Optimalisasi Tanah Pasca Galian C untuk Budidaya Tanaman Sayuran dengan Bantuan Bahan Organik dan FMA. *Jurnal Agroteknologi*, UIN Sunan Gunung Djati Bandung. Retrieved from http://digilib.uinsgd.ac.id/30925/1/OptimasiTanah

Herniwanti, Priatmadi, J B., Yanuwiadi, B., & Soemarno. (2014). Penanganan Air Asam Tambang dengan Cara Fitoremediasi Tanaman (Pasif). *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences,* 4(3), 167-176.

Hermawan, B. (2011). Peningkatan Kualitas Lahan Bekas Tambang melalui Revegetasi dan Kesesuaiannya sebagai Lahan Pertanian Tanaman Pangan. *Prosiding Seminar Nasional Budidaya Pertanian*; Urgensi dan Strategi Pengendalian Alih Fungsi Lahan Pertanian, 60-70.

Jha, V. C., & Kapat, S. (2009). Rill and Gully Erosion Risk of Lateritic Terrain in South-Western Birbhum District, West Bengal, India. *Soc. Nat., 21(2),* 141-158. http:// dx.doi.org/10.1590/ S1982-45132009000200010.

Maiti, S.K. (2003). Handbook of Methods in Environmental Studies: Air, Noise, Soil and Overburden Analysis. Eds 1st. January 2003. *ABD Publishers*. Jaipur, Rajasthan, India. ISBN: 8185771588, 9788185771588.

Nugraha, I. (2019). Galian C Ilegal di Kota Tasikmalaya Sebabkan Bencana Kekeringan Parah. Retrieved from https:// regional.kompas.com/read/2019/01/08/11520421/galian-c-ilegal-di-kota-tasill

Nurbaity, A., Hidayat, C., Huduya, D., & Sauman, J. (2013). Mycorrhizal Fungi And Organic Matter Affect Some Physical Properties of Andisols. *Soil Water Juornal,* 2.2.(1), 639-644.

Nurbaity, A., Yuniarti, A., & Sungkono. (2017). Peningkatan kualitas tanah bekas tambang pasir melalui penambahan amelioran biologis. *Jurnal Agrikultura,* 28(1), 21–26).

Oktavia, R. (2019). Identifikasi Jenis Tumbuhan dan Kondisi Tanah Revegetasi Lahan Bekas Tambang Batubara*. J Bionatural*, 6, (1), 67-79.

Pangaribuan, N., Hidayat, C., & Rachmawati, S. (2020). Efektivitas Beragam Bahan Organik & Mikroba Terhadap Sifat Fisik Tanah Pasca Galian C pada Tanaman Cabai. Laporan Penelitian. Tangerang Selatan: Universitas Terbuka.

Pangaribuan, N., Hidayat, C., & Rachmawati, S. (2021). Efektivitas Beragam Bahan Organik Dan Mikroba Terhadap Sifat Kimia Tanah Pasca Galian C Pada Tanaman Cabai. Laporan Penelitian. Tangerang Selatan: Universitas Terbuka.

Permentan. [Peraturan Menteri Pertanian]. (2006). Peraturan Menteri Pertanian Nomor:47/Permentan/OT.140/10/2006 tentang Pedoman Umum Budidaya Pertanian Pada Lahan Pegunungan.

Prayudiyaningsih, R., & Sari, R. (2016). Aplikasi Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) dan Kompos untuk Meningkatkan Pertumbuhan Semai Jati (*Tectona Grandis* Linn.F.) Pada Media Tanah Bekas Tambang Kapur.*Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea,* 5(1), 37.

Rezania, S,. Taib, SM., Din, MFM., Dahalan, FA., & Kamyab, H. (2016). Comprehensive Review on Phytotechnology: Heavy Metals Removal by Diverse Aquatic Plants Species from Wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 318, 587-599.

Rondonuwu, S.B. (2014). Fitoremediasi Limbah Merkuri Menggunakan Tanaman dan Sistem Reaktor. *Jurnal Ilmiah Sains*, 14 (1), 52-58.

Roni, N. G. K, Witariadi N. M., Candraasih N.N.K., & Siti,N.W. (2013). Pemanfaatan Bakteri Pelarut Fosfat untuk Meningkatkan Produktivitas Kudzu Tropika (*Pueraria phaseoloides* Benth). *J. Pastura*, 3 (1), 13-16.

Santi, R. (2015). Pertumbuhan Nilam (*Pogostemon cablin* Benth) pada sandy tailing asal lahan pasca penambangan timah yang diberi kompos dan tanah kupasan (overburden). (Tesis). Program Studi Ilmu Tanaman Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya.

Sheoran, V., Sheoran, A.S., & Poonia, P. (2010). Soil Reclamation of Abandoned Mine L and by revegetation: A Review, *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 3(2), Article 13.1-20.

Sembiring, S. (2008). Sifat Kimia dan Fisik Tanah Pada Areal Bekas Tambang Bauksit di Pulau Bintan Riau. *Info Hutan,* 5(2), 123-134.

Siregar, N.A., Sumono, & Munir, A.P. (2013). Permeability Study of Several Soil Types in Kwala Bekala Field Trials USU Through. *Jurnal Rekayasa,* 1, (4), 38–43.

Smith, S.E., & Smith, A. (2011). Short Title: Arbuscular Mycorrhizas and Plant Growth Fresh Perspective on the Roles of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Plant Nutrition nad Growth. Mycologia.

Sood, A., Uniyal, P.M., Prasana, R., & Ahluwalia, A.S. (2012). Phytoremediation Potential of Aquatic Macrophyte, Azolla. Ambio. *Journal of Environment and Society,* **41(2), 122–137.** 2012. **March. Published online 2011 June 21. doi: 10.1007/s13280-011-0159-z**

Sutrisno, N., & Heryani, N. (2013). Teknologi konservasi tanah dan air untuk mencegah degradasi lahan pertanian berlereng. *J. Litbang Pertanian*, 32 (3), 122-130.

Syahputra, R. (2018). Fitoremediasi Logam Cu dan Zn dengan Tanaman Eceng Gondok (*Eichornia crassipes* (mart.) solms). *Jurnal Logika,* 2 (2), 57-66.

Tribun Bali. (2017). Galian C Bodong Sebabkan Kerusakan Lingkungan di Wilayah Kecamatan Selat, Karangasem. Retrieved from https://balitribune.co.id/content/galian-c

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 1967 Tentang Ketentuan-Ketentuan Pokok Pertambangan.

Utami, N.H. (2009). Kajian Sifat Fisik, Sifat Kimia dan Sifat Biologi Tanah Paska Tambang Galian C Pada Tiga Penutupan Lahan. Institute Pertanian Bogor . Retrieved from https://docplayer.info/314190-Kajian-sifat-fisik-sifat-kimia

Vidya, Suparman, & Karjo.(2015). Kajian Pupuk Majemuk P K Terhadap Produksi Bawang Merah di Lahan Berpasir dan Dataran Rendah. Balai Pengkajian Kalimantan Tengah. Palangkaraya.

Yudha, I.G., Diantari, R., & Hasani, Q. (2021). Pemanfaatan Lahan Eks-galian Pasir untuk Perikanan. Program Faperta Berkarya. Tema "Lahan Eks-Galian Pasir Kabupaten Lampung Timur, Permasalahn dan Tantangan Pemanfaatannya untuk Budidaya Perikanan" Fakultas Pertanian UNILA. Lampung. Radar Lampung Televisi.

Yulnafatmawita, Adrinal, & Daulay, A.F. (2008). Pengaruh Pemberian Beberapa Jenis Bahan Organik terhadap Stabilitas Agregat Tanah Ultisol Limau Manis. *Solum 5(1)*: *7-13.*Universitas Andalas. Padang.

Wirawan, A. (2016). Analisis Sifat Fisik dan Kimia Tanah Pada di Kota Palu Provinsi Sulawesi Tengah. Program Studi Agroteknologi Jurusan Budidaya Pertanian. Fakultas Pertanian Universitas Tadulako. Palu.

Zulkarnain, Joy, B., Tuhpawana, P., & Prawira, I. (2014). Soil erosion assessment of the post-coal mining site in Kutai Kartanegara District, East Kalimantan Province, Internat. *J. Sci. Eng*. 7(2), 130-136.

03

ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

TOPICS:

Biodiversity
Environmental Studies
Resilient and Sustainable City
Fisheries Management
Community Development

03 ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Sri Listyarini, Guruh Sri Pamungkas

Meminimalkan Dampak Negatif Revolusi Hijau Melalui Pertanian Organik Berbasis Limbah Biomassa Kelapa Sawit di Perkebunan Sawit PT. Tebo Indah, Jambi

Mirza Permana, Guntur Bagus Pamungkas, Erika Pradana Putri, Ulul Hidayah

Model Dinamika *Urban Heat Island* (UHI) Berdasarkan Tren Penggunaan Lahan di Kota Balikpapan, Kalimantan Timur

Abdillah Munawir, Tania June, Cecep Kusmana, Yudi Setiawan

Ketersediaan Evapotranspirasi Menggunakan *Surface Energi Balance Algorithm for Land* di Taman Nasional Lore Lindu Provinsi Sulawesi Tengah

Guntur Bagus Pamungkas, Anindya Putri Tamara, Galih Hendro Wijayanto

Pengendalian Deforestasi di Kabupaten Banjarnegara, Provinsi Jawa Tengah, Indonesia: Implikasinya Untuk Membangun Ekonomi Hijau

Sodikin, Kusuma Lelana Ari Lestari, Fauzi Fahmi

Dinamika Spasial Penambahan Daratan Serta Korelasinya terhadap Luasan Mangrove di Delta Cimanuk Kabupaten Indramayu Provinsi Jawa Barat

Lina Warlina, Agus Susanto, Sumartono, Sodikin

Pemetaan Parameter Fisik Kimia Mangrove dengan Pemanfaatan Sistem Informasi Geografis di Kawasan Pesisir Indramayu

A Hadian Pratama Hamzah, Nurhasanah, Sohifah

Program Bandung Hijau Dan Bersih: Paradigma Lingkungan dan Kebijakan Publik dalam Pengelolaan Sampah

Farisa Maulinam Amo

Kebutuhan Kereta Api Penumpang pada Koridor Manado-Bitung

Jalil, Achmar Mallawa, Faisal Amir, Safruddin

Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan Tuna Madidihang (*Thunnus albacares*) secara Berkelanjutan di Perairan Teluk Bone

MEMINIMALKAN DAMPAK NEGATIF REVOLUSI HIJAU MELALUI PERTANIAN ORGANIK BERBASIS LIMBAH BIOMASSA KELAPA SAWIT DI PERKEBUNAN SAWIT PT. TEBO INDAH, JAMBI

MINIMIZING THE NEGATIVE IMPACT OF THE GREEN REVOLUTION THROUGH ORGANIC AGRICULTURE BASED ON PALM BIOMASS WASTE IN PALM OIL PLANTATION PT. TEBO INDAH, JAMBI

Sri Listyarini[1*], Guruh Sri Pamungkas[2]

[1]Program Studi Magister Studi Lingkungan, Jurusan Teknik, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
[2]Program Studi Teknologi Rekayasa Pangan, Politeknik Santo Paulus Surakarta

*listyarini@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Revolusi hijau merupakan salah satu bentuk modernisasi di bidang pertanian sebagai bentuk inovasi berkelanjutan menuju masyarakat 5.0. Di Indonesia, revolusi hijau dinyatakan sebagai upaya pemerintah untuk meningkatkan pembangunan ekonomi dan ketahanan pangan. Selain berdampak positif, revolusi hijau juga berdampak negatif; salah satu dampak negatifnya adalah ketergantungan pada penggunaan pupuk kimia yang merusak kesuburan tanah dan tidak ramah lingkungan. Untuk mengatasi ketergantungan pada penggunaan pupuk kimia yang harganya terus meningkat, PT Tebo Indah, yang bergerak di bidang perkebunan dan pabrik kelapa sawit, melakukan penelitian pengembangan limbah biomassa dari kebun dan pabrik kelapa sawit yang berupa pelepah dan tandan kosong kelapa sawit menjadi pupuk organik. Pupuk organik padat berbahan baku limbah biomassa ini dikembangkan dengan menambahkan dekomposer yang mengandung 6 (enam) jenis mikroorganisme. Hasil dekomposisi limbah biomassa yang berupa pelepah dan tandan kosong diharapkan dapat menjadi pupuk organik padat yang dapat mengurangi ketergantungan penggunaan

pupuk kimia. Hal ini akan meminimalkan salah satu dampak negatif revolusi hijau, yaitu ketergantungan pada penggunaan pupuk kimia. Selain itu, penggunaan limbah biomassa berupa pelepah dan tandan kosong sebagai bahan baku pupuk organik padat akan mengurangi timbulan limbah biomassa, yang merusak lingkungan dan rawan kebakaran di musim kemarau. Berdasarkan analisis ekonomi penggunaan pupuk organik ini akan mengurangi biaya pemupukan sebesar Rp.9,8 Milyar pada tahun ke empat.

Kata Kunci: *limbah biomassa, mikroorganisme, pupuk organik, revolusi hijau, tandan kosong kelapa sawit.*

ABSTRACT

The green revolution is a form of modernization in agriculture. In Indonesia, as a form of sustainable innovation towards society 5.0, the green revolution is stated as the government's effort to improve economic development and food security. Besides having the positive impacts, the green revolution also have the negative impacst; one of the negative impacts is the dependence on the use of chemical fertilizers that damage soil fertility and not environmentally friendly. To overcome the dependence on the use of chemical fertilizers that the prices continue to increase, PT Tebo Indah, that engaged in plantations and palm oil mills, conducted research on the development of organic fertilizer from biomass waste that comes from oil palm plantations and mills in the form of palm oil fronds and oil palm bunches empty. This organic fertilizer made from biomass waste was developed by adding a decomposer containing 6 (six) types of microorganisms. The results of the decomposition of biomass waste in the form of palm oil fronds and empty fruit bunches are expected to become solid organic fertilizers that reduce dependence on the use of chemical fertilizers. This will minimize one of the negative impacts of the green revolution, which is the dependence on the use of chemical fertilizers. In addition, the use of biomass waste in the form of palm oil fronds and empty fruit bunches as raw materials for solid organic fertilizer will reduce the generation of biomass waste, which damages the environment and is prone to fires in the dry season. Based on the economic analysis, the use of organic fertilizers will reduce the cost of fertilization by Rp. 9.8 billion in the fourth year.

Key Words: *biomass waste, microorganism, organic fertilizer, green revolution, palm oil bunch empty.*

PENDAHULUAN

Revolusi hijau merupakan salah satu bentuk modernisasi di bidang pertanian, sebagai bentuk inovasi berkelanjutan menuju masyarakat 5.0. Di Indonesia revolusi hijau merupakan upaya pemerintah untuk meningkatkan pembangunan ekonomi dan ketahanan pangan. Program revolusi hijau dijalankan semenjak rezim orde baru, dan telah menggeser pertanian tradisional ke pertanian modern. Di Indonesia proses revolusi hijau merupakan upaya pemerintah untuk meningkatkan pembangunan ekonomi dan ketahanan pangan, melalui penerapan 4 (empat) hal penting yaitu: 1) sistem irigasi untuk penyedia air, 2) penggunaan pupuk secara optimal, 3) penggunaan pestisida berdasarkan tingkat serangan hama, dan 4) penggunaan bahan tanam berkualitas seperti varietas unggul (Gultom & Harianto, 2021). Selain berdampak positif, revolusi hijau juga memiliki dampak negatif, karena menciptakan ketergantungan dan kemiskinan pada petani. Ketergantungan petani dalam menggunakan pupuk kimia yang harganya terus meningkat menjadi salah satu penyebab kemiskinan petani.

Revolusi hijau telah menggeser pertanian ekologis yang didasarkan kepada prinsip-prinsip keberlanjutan, yakni keanekaragaman varietas, kekhasan ekologis lokal, dan keseimbangan ekosistem. Sebelum revolusi hijau, pertanian dilaksanakan dengan memperhatikan keseimbangan dengan hama dan predator, siklus air, siklus hara, kesuburan tanah, seimbang dengan siklus pembenihan, penanaman, pemanenan, dan bertani dilaksanakan bukan hanya sekedar memelihara pembaharuan ekosistem. Revolusi hijau menciptakan ketidakmandirian para petani, karena mereka sangat bergantung pada pertanian modern. Para petani sangat bergantung pada penggunaan pupuk kimia dan pestisida, dan hal itu akan merusak kesuburan tanah dan tidak ramah lingkungan (Gultom & Harianto, 2021). Penelitian Saleh (2020) menyatakan dampak negatif dari revolusi hijau, yaitu adanya perubahan besar yang terjadi sejak pasca revolusi hijau; desa-desa di Asia Tenggara telah mengalami perubahan-perubahan yang fundamental. Kehidupan perdesaan dan pemenuhan kebutuhan hidup orang-orang desa di Asia Tenggara telah mengalami perubahan yang

fundamental, sehingga tidak dapat lagi ditarik asumsi bahwa pemenuhan kebutuhan hidup di pedesaan didapatkan dari pertanian. Lebih jauh lagi Saleh (2020) juga menyatakan bahwa tidak dapat lagi kita berasumsi bahwa orang-orang pedesaan menghadapi dan mengharapkan masa depannya pada bidang pertanian. Hal ini terjadi karena meningkatnya pergerakan orang desa ke kota atau sebaliknya (urbanisasi dan migrasi), pergantian dari pertanian ke non pertanian (transformasi agraris-industri), serta meningkatnya aspirasi dan pendidikan (mobilitas sosial). Penelitian lain tentang dampak negatif dari revolusi hijau dilakukan oleh Rinardi, Masruroh, Maulany, & Rochwulaningsih (2019) yang menyatakan bahwa melalui revolusi hijau, petani mengenal penggunaan pupuk buatan, benih unggul, pestisida anti hama, dan sebagainya. Akan tetapi, kemudian terjadi ketergantungan petani terhadap pemakaian pupuk buatan, pestisida anti hama, dan benih unggul, yang pada akhirnya terjadi ketergantungan petani kepada pihak luar, yaitu perusahaan besar yang memproduksi pupuk buatan, pestisida, dan sebagainya. Dengan istilah yang ekstrem terjadi bentuk neo-kolonialisme baru dalam sistem budi daya di negara-negara yang sedang berkembang. Karena dampak negatifnya lebih banyak dari dampak positifnya, maka revolusi hijau ini harus diminimalkan dampak negatifnya; dan salah satu caranya adalah dengan beralih ke pertanian organik.

Pertanian organik yaitu teknik budidaya pertanian yang mengandalkan bahan-bahan alami tanpa menggunakan bahan-bahan kimia sintetis. Pertanian organik adalah sistem pertanian yang holistik yang mengandung dan mempercepat biodiversiti, siklus biologi dan aktivitas biologi tanah (Salehah, Milla, & Rini, 2021). Penelitian tentang teknologi pertanian organik khususnya mengenai penerapan pupuk organik dan pestisida nabati oleh kelompok tani telah dilakukan oleh Nurlaela (2019). Penelitian mengenai teknologi pertanian organik yang terkait dengan kelapa sawit telah dilaksanakan oleh Ariyanti (2021), yaitu tentang penggunaan kompos pelepah kelapa sawit sebagai kompos campuran media tanam pada pembibitan kelapa sawit untuk menunjang langkah efisiensi dalam penggunaan pupuk anorganik.

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis Jacq.*) merupakan tanaman yang berasal dari Afrika Barat. Tanaman kelapa sawit ternyata tidak hanya dapat tumbuh di daerah asalnya, Afrika, tetapi di luar daerah asalnya, tanaman ini juga dapat tumbuh dengan baik dan memberikan produksi yang lebih tinggi. Di Indonesia, kelapa sawit merupakan komoditas primadona (Meylinda, Mirasari, & Roby, 2021). Produksi minyak kelapa sawit di Indonesia terus mengalami kenaikan, bahkan pada tahun 2021/2022 Indonesia merupakan produsen terbesar minyak kelapa sawit dunia (Gambar 1). Kenaikan produksi minyak kelapa sawit tentunya diiringi dengan peningkatan luas lahan perkebunan kelapa sawit yang tersebar di Indonesia. Tabel 1 memperlihatkan perkembangan luas perkebunan dan produksi kelapa sawit di Indonesia dari tahun 2016 sampai dengan 2021. Pulau Sumatera merupakan salah satu pulau yang memiliki lahan kelapa sawit sangat luas, data tahun 2019 menyatakan dari 5.896.775 hektar lahan kelapa sawit di Indonesia, 4.313.427 hektar diantaranya berada di Pulau Sumatera (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2021).

Sumber. https://www.statista.com/statistics/856231/palm-oil-top-global-producers/

Gambar 1. Indonesia Produsen Terbesar Minyak Kelapa Sawit Dunia

Tabel 1. Luas Areal dan Produksi Kelapa Sawit Indonesia Tahun 2016-2021

Tahun/ *Year*	Luas Areal / Area (Ha)				Produksi / *Production* (Ton)			
	PR / *Smallholders*	PBN / *Government*	PBS / *Private*	Jumlah/ *Total*	PR / *Smallholders*	PBN / *Government*	PBS / *Private*	Jumlah/ *Total*
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
2016	4.739.318	707.428	5.754.719	11.201.465	11.575.542	1.887.999	18.267.420	31.730.961
2017	5.697.892	638.143	7.712.687	14.048.722	13.191.189	1.861.263	22.912.772	37.965.224
2018	5.818.888	614.756	7.892.706	14.326.350	15.296.801	2.147.136	25.439.694	42.883.631
2019	5.896.775	617.501	7.942.335	14.456.611	14.925.877	2.134.367	30.060.003	47.120.247
2020*)	6.003.764	569.166	8.285.370	14.858.300	16.310.781	2.174.936	29.811.353	48.297.070
2021**)	6.084.126	579.664	8.417.232	15.081.021	16.755.437	2.226.403	30.728.504	49.710.345

Sumber: Direktorat Jenderal Perkebunan, 2021

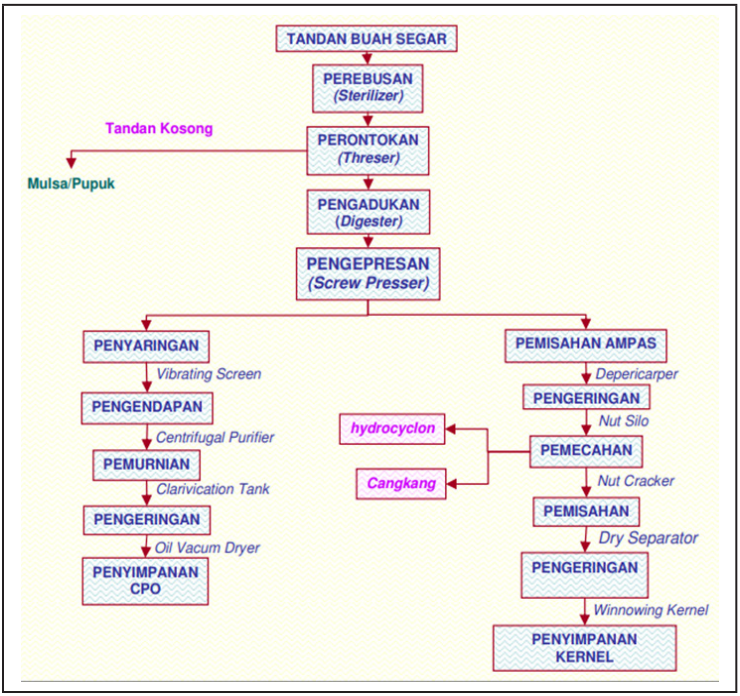
Salah satu penerapan revolusi hijau adalah penggunaan pupuk secara optimal, yang telah dilakukan juga oleh perkebunan kelapa sawit di Jambi. Kabupaten Tebo adalah salah satu kabupaten yang berada di Provinsi Jambi dengan penduduk 340.868 jiwa (BPS Provinsi Jambi, 2022). Kabupaten Tebo berada pada posisi bagian barat Provinsi Jambi tepatnya terletak diantara titik koordinat 0° 52′ 32″ - 01° 54′ 50″ LS dan 101° 48′ 57″ - 102° 49′ 17″ BT. Kabupaten Tebo dipengaruhi oleh iklim tropis dan berada pada ketinggian antara 50 - 1.000 mdpl. Kabupaten ini merupakan hasil pemekaran dari Kabupaten Bungo Tebo. Investasi PMA dan PMDN realisasi investasi PMDN di Kabupaten Tebo terus mengalami peningkatan, investasi PMDN lebih banyak bergerak pada sektor perkebunan kelapa sawit dan karet, sektor pertambangan, dan industri *Crude Palm Oil* (CPO). Sementara itu, investasi PMA lebih banyak bergerak di sektor minyak dan gas (migas) serta pertambangan batubara (Website Resmi Pemerintah Kabupaten Tebo, 2022). Luas perkebunan kelapa sawit di Provinsi Jambi merupakan yang kedua di Pulau Sumatera, setelah Provinsi Riau. Di Provinsi Jambi, produksi tanaman perkebunan kelapa sawit meningkat dari 983.496,60 ton di tahun 2020 menjadi 1.063.677,60 ton di tahun 2021. PT. Tebo Indah adalah salah satu perusahaan perkebunan kelapa sawit yang terdapat di Kabupaten Tebo Provinsi Jambi, dan merupakan perusahaan perkebunan kelapa sawit yang memiliki luasan sekitar 6000 hektar. Untuk meningkatkan produksi kelapa sawitnya, PT. Tebo Indah menggunakan pupuk kimia secara rutin. Penggunaan pupuk secara optimal merupakan salah satu penerapan revolusi hijau.

Dalam pertumbuhannya tanaman kelapa sawit membutuhkan unsur hara dan air yang cukup. Unsur hara yang sangat berpengaruh dalam pemupukan tanaman kelapa sawit meliputi N, P, K, Mg, dan B (Meylinda, Mirasari, & Roby, 2021). Sampai tahun 2021, PT. Tebo Indah menggunakan pupuk kimia untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman kelapa sawit. Ketergantungan PT. Tebo Indah dalam penggunaan pupuk kimia untuk meningkatkan produktivitas kelapa sawit menyebabkan PT. Tebo Indah harus mengeluarkan biaya yang semakin tinggi dengan meningkatnya harga pupuk kimia (Wahyudi, 2022). Kerugian penggunaan pupuk kimia tidak hanya ditinjau dari aspek ekonomi, tetapi juga dari aspek lingkungan. Penggunaan

pupuk kimia secara terus-menerus dapat membuat tanah mengeras dan kehilangan porositasnya (Massah & Azadegan, 2016). Lebih lanjut Massah dan Azadegan (2016) menyatakan penggunaan pupuk kimia melebihi dari jumlah yang direkomendasikan dalam jangka panjang akan menyebabkan akumulasi dan konsentrasi garam mineral dari pupuk, yang akan mengakibatkan pemadatan dan degradasi tanah. Hal ini dikarenakan penggunaan pupuk kimia dapat meningkatkan kadar asam dalam tanah.

Struktur tanah dapat diperbaiki dengan menambahkan bahan organik yang cukup ke tanah, mengurangi penggunaan pupuk kimia, melakukan rotasi tanaman, dan melaksanakan budidaya tanaman yang tepat, serta menggunakan metode irigasi modern (Massah & Azadegan, 2016). Untuk mengatasi degradasi kualitas tanah akibat penggunaan pupuk kimia yang berkepanjangan, perlu diupayakan penggunaan pupuk organik. Pupuk organik diketahui dapat memperbaiki kondisi tanah sehingga dapat mengurangi penggunaan pupuk kimia dan meningkatkan produktivitas (Thomas, Acquah, Whitmore, McGrath, & Haefele, 2019). Pada penelitian ini penggunaan pupuk organik yang dihasilkan dari limbah biomassa tanaman kelapa sawit dicoba untuk diterapkan pada perkebunan milik PT. Tebo Indah.

Selain memiliki perkebunan kelapa sawit, PT. Tebo Indah juga memiliki pabrik kelapa sawit. Dari perkebunan kelapa sawit dihasilkan limbah biomassa berupa pelepah hijau dan pelepah kering. Di pabrik kelapa sawit, hasil kebun yang berupa Tandan Buah Segar (TBS) diproses untuk menghasilkan CPO (*Crude Palm Oil*) dan produk lainnya. Secara umum proses pengolahan kelapa sawit mulai dari TBS sampai menghasilkan CPO dan kernel dapat dilihat pada Gambar 2. Pada diagram alir di Gambar 2 terlihat dari pabrik kelapa sawit dihasilkan limbah biomassa berupa tandan kosong dan cangkang. Selain tandan kosong dan cangkang, limbah biomassa yang dihasilkan pabrik kelapa sawit juga berupa fiber yang dihasilkan dari pengepresan dan abu boiler. Limbah biomassa kelapa sawit ini masih mengandung sejumlah nutrien, sehingga dapat dikonversi menjadi produk yang memiliki nilai ekonomi seperti kompos, pakan ternak, atau digunakan sebagai medium pertumbuhan mikroba.



Sumber: Ditjen PPHP, 2006

Gambar 2. Diagram Alir Proses Pengolahan Kelapa Sawit

Dari perkebunan dan pabrik kelapa sawit yang dimiliki PT. Tebo Indah, terdapat limbah biomassa yang selama ini belum dimanfaatkan dengan baik seperti pelepah sawit, tandan kosong, dan cangkang sawit, serta fiber dan abu boiler. Limbah biomassa kelapa sawit yang dihasilkan di PT. Tebo Indah per hari dapat mencapai lebih dari 100 ton, dan selama ini hanya ditumpuk begitu saja (Gambar 3). Limbah biomassa kelapa sawit ini jika tidak dikelola dengan baik akan merusak lingkungan. Pada musim kemarau limbah biomassa akan sangat rentan menimbulkan kebakaran hutan, karena biomassa kering sangat mudah terbakar.

Gambar 3. Limbah Biomassa Kelapa Sawit pada PT. Tebo Indah

Artikel ini memaparkan upaya yang dilakukan PT. Tebo Indah untuk mengelola limbah biomassa kelapa sawit yang dihasilkan pada perkebunan dan pabrik kelapa sawit yang berupa cangkang sawit, tandan kosong, dan pelepah pohon sawit untuk dapat digunakan sebagai bahan baku pupuk organik padat. Pembuatan pupuk dari cangkang sawit yang diperoleh dari pabrik kelapa sawit belum dilaksanakan, sehingga artikel ini hanya membahas pembuatan pupuk organik padat yang berasal dari pelepah hijau dan pelepah kering yang berasal dari kebun sawit dan tandan kosong yang berasal dari pabrik kelapa sawit.

Pupuk organik padat yang dihasilkan dari limbah biomassa kelapa sawit ini diharapkan dapat meningkatkan produktivitas tanaman kelapa sawit dan mengurangi penggunaan pupuk kimia secara signifikan. Dalam jangka panjang penggunaan pupuk organik yang dikelola dan dimanfaatkan dengan baik, tentunya akan meningkatkan pendapatan perusahaan dan juga melestarikan lingkungan dalam hal menjaga kesuburan tanah dan mencegah kebakaran hutan.

Artikel ini merupakan bagian dari Buku Seminar FST 2022 yang memiliki tema besar "Accelerating Sustainable Innovation towards Society 5.0" pada subtopik "Environment and Sustainable Development" yang relevan dengan "Environmental Studies" berbasis "Sustainable Development. Tujuan Pembangunan Berkelanjutan atau Sustainable Development Goals (SDGs) adalah pembangunan yang menjaga peningkatan kesejahteraan ekonomi masyarakat secara berkesinambungan, pembangunan yang menjaga keberlanjutan kehidupan sosial masyarakat, pembangunan yang menjaga kualitas lingkungan hidup serta pembangunan yang menjamin keadilan dan terlaksananya tata kelola yang mampu menjaga peningkatan kualitas hidup dari satu generasi ke generasi berikutnya (Bappenas, 2020). Tujuan penulisan artikel ini adalah untuk menjabarkan penelitian pengembangan pupuk organik padat yang dihasilkan dari limbah biomassa kelapa sawit yang secara umum bertujuan untuk mencapai tujuan SDGs ke lima belas, yaitu menjaga ekosistem daratan

PEMBAHASAN

Upaya pengembangan pupuk organik berbahan baku limbah biomassa perkebunan dan pabrik kelapa sawit PT. Tebo Indah sudah dimulai sejak awal tahun 2022 dan sampai saat ini masih berlangsung. Penelitian dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu: 1) Menganalisis kandungan unsur hara limbah biomassa dari kebun dan pabrik kelapa sawit; 2) Membuat pupuk organik padat berbasis limbah biomassa kelapa sawit yang berupa pelepah dan tandan kosong; dan 3) Menganalisis biaya pemupukan kebun kelapa sawit dari tahun pertama

sampai tahun ke empat dengan penggunaan pupuk kimia yang dikurangi secara bertahap serta menambahkan pupuk organik yang dibuat dari limbah biomassa kelapa sawit.

1. Analisis Kandungan Unsur Hara Limbah Biomassa Kelapa Sawit

Penelitian tentang kandungan unsur hara limbah tandan kosong dari pabrik kelapa sawit PT. Tebo Indah telah dilakukan dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 2. Sedangkan kandungan unsur hara dari limbah biomassa yang berupa cangkang sawit dan pelepah kelapa sawit di PT Tebo Indah belum dilakukan analisisnya. Namun demikian analisis kandungan hara cangkang sawit telah dilakukan oleh peneliti Khor, Lim, dan Zainal (2009) seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Kandungan Unsur Hara Limbah Tandan Kosong dari Pabrik Kelapa Sawit PT. Tebo Indah

Parameter Uji	Tandan Kosong	Standar SNI 19-7030-2004	Ditjen PPHP (2006)
pH H_2O	8,13	6,80 – 7,49	
N – Total	0,41	min 0,40%	0,350
P – Total	7,23	min 0,1%	0,028
K – Total	32,23	min 0,2%	2,285
Ca - Total	9,12	maks 25,5%	0,149
Mg - Total	2460,58	maks 6000 ppm	0,175
Si - Total	21,87	-	
C-Organik	5,12	9,80 – 32%	
Cu	71,11	maks 100 mg/kg	
Zn	401,51	maks 500 mg/kg	
Fe	1,22	maks 2%	
Mn	0,098	maks 0,1%	
Hg	-	maks 0,8 mg/kg	
Pb	0,11	maks 150 mg/kg	

Sumber: Sampel Uji No. B445189

Tabel 3. Kandungan Hara Cangkang Sawit

Proximate analysis (wt % ar)	
Moisture	8.65
Volatile	75.09
Ash	3.92
Fixed carbon	12.34
Higher calorific value (MJ kg^{-1})	18.66
Elemental analysis (wt % mf)	
Carbon	43.21
Hydrogen	7.42
Nitrogen	0.86
Sulphur	0.75
Oxygen (by difference)	47.76
Chemical analysis (wt % mf)	
Hemicelluloses	33.52
Cellulose	38.52
Lignin	20.36
Extractives	3.68
Ash	3.92

Sumber: Khor, Lim, dan Zainal, 2009

Data pada Tabel 2 memperlihatkan bahwa kandungan unsur hara pada limbah tandan kosong kelapa sawit cukup banyak, terutama kandungan unsur K yang lebih dari 32 persen dan unsur P yang lebih dari 7 persen. Menurut Thomas, Acquah, Whitmore, McGrath, & Haefele (2019) unsur N, P, dan K merupakan unsur hara utama yang sangat diperlukan pada pertumbuhan tanaman. Hasil pengujian unsur hara yang terkandung dalam limbah tandan kosong kelapa sawit dari PT. Tebo Indah memperlihatkan bahwa kandungan unsur hara N, P, K, Ca, dan Mg melebihi dari data yang ada pada data kandungan hara limbah kelapa sawit yang dikeluarkan oleh Ditjen PPHP (2006). Hal ini dapat menjadi rujukan bahwa limbah biomassa sawit yang dihasilkan dari perkebunan dan pabrik kelapa sawit di

PT. Tebo Indah dapat dijadikan bahan baku pupuk organik padat. Mengingat unsur N pada limbah tandan kosong hanya 0,41 persen, sedangkan unsur N banyak di udara, maka pada penelitian ini limbah tandan kosong sawit diberi dekomposer yang mengandung mikroorganisme penambat N dan juga bakteri fiksasi N non symbion. Demikian juga limbah pelepah sawit yang berasal dari kebun sawit diberi dekomposer yang sama untuk meningkatkan kandungan hara, terutama yang berupa N.

2. Pembuatan Pupuk Organik Padat Berbasis Limbah Biomassa Sawit

Pembuatan pupuk organik padat berbasis limbah biomassa kelapa sawit pada umumnya bertujuan untuk: 1) Memperbaiki sifat fisik tanah, sehingga tanah menjadi gembur, strukturnya lebih baik, meningkatkan pH, dan lain-lain; 2) Menetralkan tanah dari keasaman yang ekstrem; 3) Menyimpan air 5-7 kali beratnya; 4) Sebagai *buffer* agar tanaman tidak menyerap unsur logam berat; 5) Memberikan unsur hara makro lengkap; 6) Memberikan unsur hara mikro lengkap (lebih dari 100 unsur); 7) Menambahkan dan mendukung pertumbuhan mikroorganisme tanah dengan berbagai fungsi; 8) Mengandung mikroorganisme penambat N dan pelarut phosphat; 9) Mengandung Zat Pengatur Tumbuh (ZPT) yang dapat menstimulasi tanaman untuk cepat tumbuh; dan 10) Mendukung tanaman untuk membentuk akar yang besar, banyak, dan sehat.

Sebelum dibuat pupuk, limbah biomassa kelapa sawit perlu dianalisis ketersediaannya, agar pada saat pembuatan pupuk dalam skala industri tidak terkendala dengan jumlah bahan baku yang tersedia. Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap ketersediaan berbagai bahan baku pupuk organik yang berupa berbagai limbah yang ada pada perkebunan dan pabrik kelapa sawit milik PT. Tebo Indah (Tabel 4).

Tabel 4. Analisis Ketersediaan Limbah Biomassa

No	Uraian	Volume	Satuan	Keterangan
1	Luas kebun	6.000	hektar	
2	Produktivitas Tanaman	25	Ton/Ha/th	
3	Kapasitas PKS	30	Ton TBS/ jam	
4	Hari Kerja Per Tahun	300	hari	
5	Jam Kerja Per Hari	20	jam	
6	Produksi TBS	150.000	Ton/tahun	
7	Tandan kosong	31.500	Ton/tahun	21 % TBS
8	Fiber	21.600	Ton/tahun	14,4% TBS
9	Cangkang	9.600	Ton/tahun	6,4% TBS
10	POME	87.450	Ton/tahun	58,3 % TBS

Selama ini limbah biomassa kelapa sawit pada PT. Tebo Indah yang jumlahnya seperti pada Tabel 4 dibiarkan menggunung seperti terlihat pada Gambar 4. Kondisi ini sangat buruk bagi lingkungan, terutama pada musim kemarau gunungan limbah biomassa kelapa sawit ini sangat rawan, karena dapat menjadi pemicu kebakaran hutan.

Gambar 4. Gunungan Limbah Biomassa Kelapa Sawit di PT. Tebo Indah

Limbah biomassa kelapa sawit yang jumlahnya cukup banyak ini sangat potensial untuk dijadikan bahan baku pupuk organik. Menurut Irawati et al. (2020), biomassa merupakan material organik dengan unsur karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O) yang dapat terdekomposisi menjadi unsur-unsurnya, baik oleh mikroorganisme maupun degradasi panas. Komponen utama limbah kelapa sawit adalah selulosa, hemiselulosa, dan lignin (Sapareng, Kuswinanti, & Rasyid, 2017). Pada penelitian ini proses pembuatan pupuk organik atau kompos dari limbah

biomassa kelapa sawit pada PT. Tebo Indah dilakukan dengan menggunakan mikroorganisme. Kompos merupakan bahan organik yang telah mengalami dekomposisi oleh mikroorganisme pengurai sehingga dapat digunakan untuk memperbaiki sifat-sifat tanah (Singh & Kalamdhad, 2019).

Pembuatan pupuk organik dengan bahan baku limbah biomassa kelapa sawit diawali dengan proses pencacahan untuk membantu dekomposisi dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Proses pembuatan pupuk organik dari tandan kosong, yang diperoleh dari pabrik kelapa sawit, berbeda dengan pembuatan pupuk dari pelepah sawit, yang berasal dari perkebunan kelapa sawit. Perbedaan terutama terdapat pada proses pencacahan. Pencacahan pelepah kelapa sawit baik yang masih hijau maupun yang sudah kering dilakukan pada areal perkebunan, sedangkan pencacahan tandan kosong kelapa sawit dilakukan di areal pabrik. Dalam penelitian ini, tandan kosong segar yang baru keluar dari pabrik kelapa sawit, dicacah menggunakan mesin *crusher* sehingga ukurannya menjadi kecil, sampai berbentuk serabut seperti terlihat pada Gambar 5.a. Sedangkan pelepah kering dan pelepah hijau kelapa sawit yang berada pada areal perkebunan dicacah menggunakan mesin *crusher* yang dibawa ke areal perkebunan seperti terlihat pada Gambar 5.b dan 5.c.

Gambar 5.a. Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebelum dan Sesudah Dicacah

Gambar 5.b. Pelepah Kering Sebelum dan Sesudah Dicacah

Gambar 5.c. Pelepah Hijau Kelapa Sawit Sebelum dan Sesudah Dicacah

Semakin kecil ukuran pelepah dan tandan kosong kelapa sawit maka akan semakin besar volume kontak antara pelepah dan tandan kosong dengan dekomposer, sehingga akan mempercepat proses dekomposisi. Cacahan pelepah dan tandan kosong kelapa sawit selanjutnya dicampur dengan dekomposer yang mengandung mikroorganisme pendegradasi bahan organik, dengan perbandingan 0,01% dekomposer dan 20% air, dengan asumsi kandungan kadar air total bahan adalah 40-60%. Pendapat Kusuma (2012) bahwa kadar air optimal dalam proses pengomposan adalah 40- 60%.

Mikroorganisme pendegradasi bahan organik salah satunya adalah bakteri. Bakteri merupakan agen biologi penting yang mempunyai kemampuan dalam biodegradasi limbah biomassa. Kemampuan adaptasi bakteri yang tinggi

memungkinkan untuk tumbuh pada substrat dan lingkungan yang tidak mendukung bagi pertumbuhan organisme lain (Anindyawati, 2009). Peneliti lain, Wardani (2011) berpendapat bahwa bakteri selulolitik akan mengeluarkan enzim selulase untuk mendegradasi selulosa menjadi senyawa C sederhana, agar memperoleh energi dan sumber karbon. Bakteri selulolitik mempunyai peran terbesar dalam mendegradasi pelepah dan tandan kosong kelapa sawit. Selulase yang diproduksi merupakan enzim yang berperan dalam proses biokonversi limbah-limbah organik berselulosa yang spesifik memotong ikatan β-1,4 glikosidik pada selulosa, yaitu melibatkan enzim endoglukanase, eksoglukanase, dan β-glukosidase (Meryandini et al., 2009).

Selain bakteri, jamur juga merupakan salah satu mikroba yang dapat mendegradasi limbah pelepah dan tandan kosong kelapa sawit. Menurut pendapat Masai, Katayama, & Fukuda (2007), kemampuan jamur dalam mendegradasi lignin disebabkan adanya enzim ekstraseluler yang disekresikan oleh hifa jamur, seperti mempercepat proses pengomposan oleh Trichoderma (Sapareng, Kuswinanti, & Rasyid, 2017). Eaton dan Hale (1993) menyebutkan berbagai enzim yang berperan dalam proses degradasi lignin yang disekresikan oleh jamur pelapuk putih meliputi lignin peroksidase (LiP), mangan peroksidase (MnP), laktase, demetoksilase, H_2O_2-*generating enzyme*, dan enzim pendegradasi monomer seperti selobiosa dehidrogenase, asam vanilat hidrolase, dan trihidroksi benzendioksigenase. Namun enzim ligninolitik utama yang dihasilkan jamur adalah lignin peroksidase (LiP), mangan peroksidase (MnP), dan laktase. Mikroorganisme yang digunakan pada dekomposer penelitian ini dan fungsinya dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Jenis dan Fungsi Mikroorganisme pada Dekomposer

No	Jenis	Fungsi
1	Rhizobium sp	bakteri penambat N
2	Azotobacter	sebagai anti fungi patogen, penghasil ZPT (Zat Pengatur Tumbuh)
3	Azospirilium	sebagai bakteri fiksasi N non symbiont, penghasil fitohormon
4	Bacillus sp	pelarut fosfat, sintesis hormon IAA
5	Lactobacillus plantarum	pendegradasi bahan organik
6	Trichoderma	pendegradasi bahan organik dan non organik maupun logam berat serta sebagai agensia hayati
7	Gliocladium	pendegradasi bahan organik dan sebagai agensia hayati
8	Aspergillus niger	pendegradasi pati dan sebagai jamur pelarut Fosfat

Variasi pencampuran yang dilakukan pada penelitian meliputi fermentasi pelepah segar saja, fermentasi pelapah kering saja, fermentasi tandan kosong, dan kombinasi dari ketiganya dengan pembanding atau kontrolnya adalah bahan biomassa kelapa sawit tersebut tanpa adanya perlakuan dan hanya ditumpuk saja. Selanjutnya dilakukan pengamatan proses pengomposan selama 21 hari. Hasil proses pengomposan selama 21 hari untuk pelepah hijau yang telah dicacah dapat dilihat pada Gambar 6.

(a) (b)

Keterangan: (a).Pelepah Hijau Cacah Tanpa Perlakuan, (b). Pelepah Hijau Cacah Fermentasi

Gambar 6. Pelepah Hijau Cacah Sebelum dan Sesudah Dekomposisi

Dari hasil pengamatan pada pelepah hijau yang difermentasi terjadi perubahan warna dari warna hijau menjadi hitam, memiliki bau khas fermentasi dan teksturnya lebih mudah hancur apabila digenggam. Hal ini membuktikan adanya proses dekomposisi yang lebih cepat karena peran mikroba yang ditambahkan pada proses fermentasi. Berbeda dengan yang tidak diberi perlakuan, meskipun warnanya juga berubah tetapi bau masih cenderung seperti pertama kali dicacah, hanya baunya sudah tidak begitu kuat sedangkan tekstur masih keras meskipun sudah ada perubahan.

Hasil proses pengomposan selama 21 hari untuk pelepah kering yang telah dicacah dapat dilihat pada Gambar 7.

(a) (b)

Keterangan: (a). Pelepah Kering Cacah tanpa Perlakuan, (b). Pelepah Kering Cacah Fermentasi

Gambar 7. Pelepah Kering Cacah Sebelum dan Sesudah Dekomposisi

Pada pelepah kering yang difermentasi terjadi perubahan warna yaitu dari warna cokelat menjadi hitam, memiliki bau khas fermentasi dan teksturnya lebih mudah hancur apabila digenggam. Hal ini membuktikan adanya proses percepatan dekomposisi bahan organik pada pelepah kering. Berbeda dengan yang tidak diberi perlakuan, warnanya cenderung tidak berubah masih berwarna kecokelatan dan bau masih cenderung seperti pertama kali dicacah, hanya sudah tidak begitu kuat, sedangkan teksturnya masih keras meskipun sudah ada perubahan.

Hasil proses pengomposan tandan kosong selama 21 hari yang telah dicacah dapat dilihat pada Gambar 8.

(a)

(b)

Keterangan: (a). Tandan kosong cacah tanpa Perlakuan, (b). Tandan kosong cacah fermentasi

Gambar 8. Tandan Kosong Cacah Sebelum dan Sesudah Dekomposisi

Sama halnya dengan dekomposisi pelepah, tandan kosong yang sudah dicacah dan dilakukan proses fermentasi terjadi perubahan warna yaitu dari warna dari cokelat menjadi hitam, memiliki bau khas fermentasi dan teksturnya lebih mudah hancur apabila dicabut. Hal ini juga menunjukkan adanya proses percepatan dekomposisi bahan organik pada tandan kosong yang sudah dicacah. Berbeda dengan yang tidak diberi perlakuan warnanya cenderung tidak berubah masih berwarna kecokelatan dan bau masih cenderung seperti pertama kali dicacah hanya saja teksturnya masih keras.

Hasil proses pengomposan campuran pelepah hijau, pelepah kering, dan tandan kosong selama 21 hari yang telah dicacah dapat dilihat pada Gambar 9.

(a) (b)

Keterangan: (a). Campuran yang dicacah tanpa perlakuan,
(b). Campuran yang dicacah dan fermentasi

Gambar 9. Campuran Pelepah Hijau, Pelepah Kering, dan Tandan Kosong Sebelum dan Sesudah Dekomposisi

Pada proses fermentasi campuran antara pelepah segar, pelepah kering, dan tandan kosong yang sudah dicacah terjadi perubahan warna yaitu dari warna hijau dan cokelat menjadi hitam, memiliki bau khas fermentasi, dan teksturnya lebih mudah hancur apabila digenggam dan dicabut. Hal ini juga menunjukkan adanya proses percepatan dekomposisi bahan organik pada campuran yang sudah dicacah. Berbeda dengan yang tidak diberi perlakuan, warnanya cenderung tidak berubah masih berwarna kecokelatan dan bau masih cenderung seperti pertama kali dicacah, sedangkan tekstur masih keras.

Hasil dekomposisi biomassa kelapa sawit yang berupa pelepah dan tandan kosong setelah 21 hari selanjutnya siap untuk diaplikasikan pada tanaman kelapa sawit, sesuai dengan dosis yang ditentukan. Menurut Darliana (2020), aktivitas enzim selulase meningkat kembali hingga mencapai pada puncak tertinggi (kondisi optimum) dalam aktivitasnya pada hari ke-21. Hal ini saling berkaitan karena struktur tandan kosong kelapa sawit terluar adalah komponen lignin yang berfungsi untuk memperkokoh pohon, sedangkan komponen selulosa berada pada lapisan yang berikatan dengan lignin. Maka diperlukan

perombakan komponen lignin terlebih dahulu sebelum perombakan selulosa. Sehingga didapatkan aktivitas enzim selulase tertinggi baru pada hari ke-21. Ciri khas dekomposisi yang sudah matang umumnya berwarna gelap (cokelat kehitaman) dan teksturnya remah serta tidak lagi terlihat bentuk asalnya. Penambahan kompos atau pupuk organik yang masih mentah (belum terurai) dapat mengakibatkan N tanah yang diserap tanaman akan berkurang. Sebaliknya, jika menambah kompos atau pupuk organik yang sudah matang maka akan menyumbang unsur hara N ke dalam tanah dan tanaman mendapatkan tambahan N (Firmansyah, 2010).

Penelitian pengembangan pupuk organik berbasis limbah biomassa kelapa sawit pada perkebunan dan pabrik kelapa sawit milik PT. Tebo Indah belum selesai dilaksanakan, karena baru sampai tahap pembuatan kompos atau pupuk organik. Pupuk organik yang dihasilkan ini belum diaplikasikan ke tanaman kelapa sawit yang ada, sehingga data tentang efektivitas penggunaan pupuk organik ini belum diperoleh. Namun demikian, analisis mengenai estimasi penurunan biaya pemupukan dengan penggunaan pupuk organik yang dihasilkan dari limbah biomassa kelapa sawit sudah dilakukan.

3. Analisis biaya pemupukan kebun kelapa sawit tahun pertama sampai dengan tahun ke empat

Analisis biaya pemupukan dengan mengaplikasikan pupuk organik untuk mengurangi penggunaan pupuk kimia kebun kelapa sawit tahun pertama sampai dengan tahun ke empat pada PT. Tebo Indah, dapat dilihat pada Tabel 6. Perhitungan pada Tabel 6 dilakukan dengan asumsi luas kebun 6.000 hektar dan pupuk organik padat (POP) yang digunakan sebanyak 260 kg per hektar (diperoleh dari rata-rata hasil penelitian Febian, Biyatmoko, Akbar, & Lilimantik, 2020). Asumsi berikutnya adalah biaya penggunaan pupuk kimia per tahun per hektar adalah Rp.7.000.000,00 (tujuh juta rupiah). Penggunaan pupuk kimia pada tahun pertama akan berkurang sebanyak 25%, tahun ke dua 35%, tahun ke tiga 45%, dan tahun ke empat 50% (diolah dari Direktorat Jenderal Perkebunan (2021); Ditjen PPHP (2006); Meylinda, Mirasari, & Roby (2021); dan Saragih, Suswatiningsih, & Santosa (2017)). Saragih, Suswatiningsih, dan Santosa (2017) menyatakan biaya pemupukan tanaman

kelapa sawit adalah biaya yang dikeluarkan selama aktivitas pemupukan tanaman kelapa sawit termasuk tenaga penebar pupuk, tenaga pengecer pupuk, tenaga pengangkut pupuk dan transportasi pupuk, yang dalam penelitian ini termasuk dalam kegiatan tenaga pemupukan POP dan biaya pemupukan kimia.

Tabel 6. Analisis Biaya Pemupukan Kebun Kelapa Sawit

No	Jenis Kegiatan	Jumlah	Satuan	Biaya	Tahun 1	Tahun 2	Tahun 3	Tahun 4
1	Pupuk organik padat (POP)	6.000	kg	260	1.560.000	1.560.000	1.560.000	1.560.000
2	Tenaga pemupukan POP	3	HOK	100.000	300.000	300.000	300.000	300.000
3	Biaya pemupukan kimia		Rp.		5.250.000	4.550.000	3.850.000	3.500.000
	Total		Rp.		7.110.000	6.410.000	5.710.000	5.360.000
	Selisih per hektar		Rp.		110.000	- 590.000	- 1.290.000	- 1.640.000
	Selisih per 6000 hektar		Rp.		660.000.000	- 3.540.000.000	- 7.740.000.000	- 9.840.000.000

Pada tahun pertama, biaya pemupukan gabungan antara pupuk organik yang dihasilkan dari limbah biomassa kelapa sawit dan pupuk kimia masih lebih tinggi dibandingkan dengan pemupukan menggunakan pupuk kimia seluruhnya, sebesar Rp. 110.000,00 per hektar. Biaya pemupukan pada tahun ke dua berkurang sebanyak Rp.590.000,00 (9%) per hektar atau Rp.3.540.000.000,00 untuk luas kebun 6000 hektar. Biaya pemupukan pada tahun ke tiga berkurang sebanyak Rp. 1.290.000,00 (23%) per hektar atau Rp.7.740.000.000,00 untuk luas kebun 6000 hektar. Biaya pemupukan akan terus menurun dengan penambahan penggunaan pupuk organik padat, dan diperkirakan pada tahun ke empat penghematan dapat dilakukan sebesar Rp.9.840.000.000,00 atau hampir 10 Milyar Rupiah untuk luas kebun 6000 hektar. Penghematan biaya pemupukan ini sudah memperhitungkan tenaga kerja yang dibutuhkan, waktu pelaksanaan pemupukan, pembersihan gulma, sarana dan prasarana (termasuk alat pencacah dan transportasi pupuk).

KESIMPULAN

Hasil penelitian pemanfaatan limbah biomassa kelapa sawit yang berupa pelepah dan tandan kosong sebagai bahan baku pupuk organik pada perkebunan sawit PT. Tebo Indah adalah: 1) Limbah biomassa kebun sawit masih memiliki kandungan unsur hara yang sangat diperlukan bagi pertumbuhan tanaman, terutama kandungan unsur K yang lebih dari 32%; 2) Pembuatan pupuk organik padat berbasis limbah biomassa kelapa sawit dengan menggunakan dekomposer berisi mikroorganisme dapat mengurangi timbulan limbah biomassa kelapa sawit; dan 3) Biaya pemupukan kebun kelapa sawit tahun pertama sampai dengan tahun ke empat dengan mengaplikasikan campuran pupuk organik yang dihasilkan dari limbah biomassa dan pupuk kimia mengalami penurunan sebesar 9% pada tahun ke dua, 23% pada tahun ke tiga, dan 31% tahun ke empat. Pada tahun ke empat penghematan yang dapat dilakukan oleh PT. Tebo Indah dalam pemupukan mencapai hampir 10 Milyar Rupiah.

Penggunaan limbah biomassa berupa pelepah dan tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan baku pupuk organik diharapkan dapat mengurangi salah satu dampak negatif revolusi hijau, yaitu meminimalkan ketergantungan pada penggunaan pupuk kimia. Penggunaan limbah biomassa dari perkebunan dan pabrik kelapa sawit ini akan menghemat biaya pemupukan, dan tentunya akan meningkatkan penghasilan PT. Tebo Indah. Dari aspek lingkungan, limbah biomassa dari perkebunan dan pabrik kelapa sawit yang dijadikan pupuk organik akan meningkatkan kesuburan tanah dan mencegah kebakaran hutan, yang merupakan tujuan ke 15 SDGs yaitu menjaga ekosistem daratan.

DAFTAR PUSTAKA

Anindyawati, T. (2009). *Prospek enzim dan limbah lignoselulosa untuk produksi bioetanol*. Cibinong: Pusat Penelitian Bioteknologi-LIPI.

Ariyanti, M. (2021). Manfaat pelepah sebagai sumber bahan organik pada media tanam kelapa sawit. *PASPALUM: Jurnal Ilmiah Pertanian*, 9(1), 77-85.

Bappenas. (2020). Sekilas SDGs. Retrieved from https://sdgs.bappenas.go.id/sekilas-sdgs/

BPS Provinsi Jambi. (2022). Provinsi Jambi dalam angka 2022. Jambi: BPS Provinsi Jambi.

Darliana, I. (2020). Biodegradasi limbah tandan kosong kelapa sawit (*Elaeis guineensis Jacq*.) menggunakan konsorsium bakteri penghasil enzim selulase. *Jurnal Wanamukti*, 23(1), 1-9.

Direktorat Jenderal Perkebunan. (2021). *Statistik perkebunan unggulan nasional 2019-2021*. Jakarta: Direktorat Jenderal Perkebunan, Kementerian Pertanian, Republik Indonesia.

Ditjen PPHP. (2006). *Pedoman pengelolaan limbah industri kelapa sawit*. Jakarta: Subdit Pengelolaan Lingkungan. Direktorat Pengolahan Hasil Pertanian. Ditjen PPHP. Departemen Pertanian.

Eaton, R.A., & Hale, M.D.C. (1993). *Wood, decay, pests and protection*. London: Chapman and Hall.

Febian, A., Biyatmoko, D., Akbar, A.R.M., & Lilimantik, E. (2020). Nilai ekonomi lingkungan pemanfaatan limbah cair dan limbah tankos hasil pengolahan industri kelapa sawit PT. Musirawas Citraharpindo. *EnviroScienteae*, 16(3), 351-357.

Firmansyah, A. M. (2010). *Teknik pembuatan kompos*. Kalimantan Tengah: Balai Pengkajian Teknologi Pertanian.

Gultom, F. & Harianto, S. (2021). Revolusi hijau merubah sosial-ekonomi masyarakat petani. *Jurnal Pembangunan Sosial*, 4(2), 145-154.

Irawati, D., Lukmandaru, G., Sulistyo, J., Sunarta, S., Listyanto, T., Widada, J., Supriyatno, N., & Rizal, Y. (2020). Pemanfaatan limbah biomassa sawit ramah lingkungan. *Indonesian Journal of Community Engagement*, 6(4), 222–229.

Khor, K.H., Lim, K.O., & Zainal, Z.A. (2009). Characterization of bio-oil: a by product from slow pyrolysis of oil palm empty fruit bunches. *Journal Applied Sciences*, 6(9), 1647-1652.

Kusuma, M. A. (2012). Pengaruh variasi kadar air terhadap laju dekomposisi kompos sampah organik di Kota Depok (Tesis Fak. Teknik Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Indonesia).

Masai, E., Katayama, Y., & Fukuda, M. (2007). Genetic and biochemical investigations on bacterial catabolic pathways for lignin-derived aromatic compounds. *Biosci Biotechnol and Biochemist*, 71(1), 1-15.

Massah, J. & Azadegan, B. (2016). Effect of chemical fertilizers on soil compaction and degradation. *Agricultural Mechanization In Asia, Africa, And Latin America*, 47(1), 44-50.

Meryandini, A., Widosari, W., Maranatha, B., Sunarti, T.C., Rachmania, N., & Satria, H. (2009). Isolasi bakteri selulolitik dan karakterisasi enzimnya. *Makara Sains*, 13(1), 33-38.

Meylinda, Mirasari, R., & Roby. (2021). Realisasi pemupukan dan produksi kelapa sawit di PT. Jaya Mandri Sukses. *Buletin LOUPE*, 17(01), 140-145.

Nurlaela, N. (2019). Penerapan pertanian organik (pupuk organik dan pestisida nabati) di kelompok tani Kabupaten Sleman dan Bantul. *Jurnal AgroSainTa*, 3(2), 98-102.

Rinardi, H., Masruroh, N.N., Maulany, N.N., & Rochwulaningsih, Y. (2019). Dampak revolusi hijau dan modernisasi teknologi pertanian: studi kasus pada budi daya pertanian bawang merah di Kabupaten Brebes. *Jurnal Sejarah Citra Lekha*, 4(2), 125-136.

Saleh, A. (2020). Perubahan sosial budaya masyarakat pedesaan pasca revolusi hijau. *Moderasi Jurnal Studi Ilmu Pengetahuan Sosial*, 1(1), 71-93.

Salehah, N.E., Milla, A.N., & Rini, N.K. (2021). Positioning produk pertanian organik. *Paspalum*: *Jurnal Ilmiah Pertanian*, 9(2), 135-144.

Sapareng, S., A. Ala, T. Kuswinanti, & B. Rasyid, (2017). The role of rot fungi in composting process of empty fruit bunches of oil palm. *Int. J. Curr. Res. Biosci. Plant Biol*, 4(3), 17-22.

Saragih, L.R., Suswatiningsih, T.E., & Santosa, T.N.B. (2017). Kajian biaya pemupukan pada tanaman kelapa sawit menghasilkan (Elaeis guineensis jacq) di PT. Barumun Agro Sentosa. *Jurnal Agromast*, 2(1).

Singh, J. & Kalamdhad, A. (2019). *Composting process dalam bioavailability, leachability, chemical speciation, and bioremediation of heavy metals in the process of composting,* chapter 2. Boca Raton, FL: CRC Press. Taylor & Francis Group.

Thomas, C.L., Acquah, G.E., Whitmore, A.P., McGrath, S.P., & Haefele, S.M. (2019). The effect of different organic fertilizers on yield and soil and crop nutrient concentrations. *Agronomy*. 9, 776-791.

Wahyudi, N. A. (2022). Harga pupuk konsisten melejit, apa sebabnya? Retrieved from: https://ekonomi.bisnis.com/read/20220207/12/1497301/harga-pupuk-konsisten-melejit-apa-sebabnya

Wardani, S.A. (2011). *Isolation and identification of aerobic protein degrading bacteria from the temporary garbage disposal Benteng Surabaya*. Retrieved from http://digilib.its.ac.id/ITS- Undergraduate-.

Website Resmi Pemerintah Kabupaten Tebo. (2022). Retrieved from https://tebokab.go.id/

MODEL DINAMIKA URBAN HEAT ISLAND (UHI) BERDASARKAN TREN PENGGUNAAN LAHAN DI KOTA BALIKPAPAN, KALIMANTAN TIMUR

MODEL OF URBAN HEAT ISLAND (UHI) DYNAMICS BASED ON LAND USE TRENDS IN BALIKPAPAN CITY, EAST KALIMANTAN

Mirza Permana*, Guntur Bagus Pamungkas, Erika Pradana Putri, Ulul Hidayah

Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Jurusan Teknik, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

*permanamirza@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Kota Balikpapan merupakan salah satu wilayah yang ditetapkan sebagai Pusat Kegiatan Nasional (PKN). Letak geografis yang strategis menjadikan Kota Balikpapan sebagai pintu gerbang untuk pembangunan Indonesia Bagian Timur. Hal ini berdampak pada peningkatan aktivitas penduduk yang menyebabkan terjadinya perubahan lahan. Meningkatnya perubahan penggunaan lahan di Kota Balikpapan telah mengakibatkan tingginya penyerapan kapasitas dan konduktivitas panas yang melahirkan fenomena urban heat island (UHI). Tujuan penelitian ini yaitu untuk menganalisis tren perubahan penggunaan lahan dan hubungannya dengan tren kenaikan suhu permukiman di Kota Balikpapan pada periode 2004 – 2020 dengan menggunakan metode deskriptif kuantitatif dan dibantu oleh software QGIS 3.22.4. Hasil penelitian menunjukan bahwa terjadi pergeseran pola pemanfaatan lahan di Kota Balikpapan. Perkembangan lahan terbangun mengalami kenaikan yang signifikan dari tahun 2004 hingga 2020. Selama 16 tahun perkembangan lahan terbangun mengalami kenaikan sebesar 24,6%. Tren penggunaan lahan di Kota Balikpapan memperlihatkan lahan pertanian baik kebun/ladang dan sawah dominan berubah fungsi menjadi kawasan terbangun. Perubahan penggunaan lahan tersebut berdampak pada perubahan kualitas lingkungan, salah satunya kenaikan suhu perkotaan. Suhu permukaan di wilayah Kota Balikpapan pada tahun 2004 berkisar antara 16 – 33,12°C dengan rata-rata suhu permukaan sebesar 20°C. Di tahun 2013, persebaran suhu permukaan di wilayah Kota Balikpapan adalah antara

16 – 37,69°C dengan rata-rata suhu permukaan sebesar 25°C. Pada tahun 2020, suhu permukaan di wilayah Kota Balikpapan mencapai 16 – 37,69°C dengan rata-rata suhu permukaan sebesar 26°C. Sisi selatan hingga ke arah utara Kota Balikpapan menunjukkan kenaikan suhu permukaan yang cukup signifikan. Hal ini dikarenakan pada area tersebut menjadi konsentrasi dari aktivitas perkotaan mulai dari permukiman, perdagangan, jasa, dan industri serta mobilitas kendaraan sangat tinggi.

Kata Kunci: *kualitas lingkungan, penggunaan lahan, pusat kegiatan nasional, suhu permukaan.*

ABSTRACT

Balikpapan City is the gateway to Eastern Indonesia. This is following its position as a National Activity Center (PKN). Increasing land-use changes in Balikpapan City have resulted in high absorption of capacity and heat conductivity which gave birth to the phenomenon of urban heat island (UHI). The purpose of this study is to analyze the trend of land-use change and its relation with the movement of increasing temperature of settlements in Balikpapan City in the period 2004 – 2020 using quantitative descriptive methods and assisted by QGIS 3.22.4 software. The results showed that there was a conversion in land use patterns in Balikpapan City. The development of the built-up areas has increased significantly from 2004 to 2020. Over the past 16 years, the development of built-up area has increased by 24.6%. The trend of land use in Balikpapan City shows that agricultural land has been dominantly transformed into built-up areas. Uncontrolled changes in land use lead to changes in environmental quality, one of which is urban temperature. In 2004, the distribution of surface temperature in the Balikpapan City area was between 16.00 – 33.12°C with an average surface temperature of 20°C. In 2013, the distribution of surface temperature in the Balikpapan City area was between 16.00 – 37.69°C with an average surface temperature of 25°C. In 2020, the distribution of surface temperatures in the Balikpapan City area was between 16.00 - 37.69°C with an average surface temperature of 26°C. The south side to the north of Balikpapan City shows a significant increase in surface temperature. This is because the area is a concentration of urban activities ranging from settlements, trade in services, and industry as well as very high vehicle mobility.

Keywords: *environmental quality, land use, national activity center, surface temperature.*

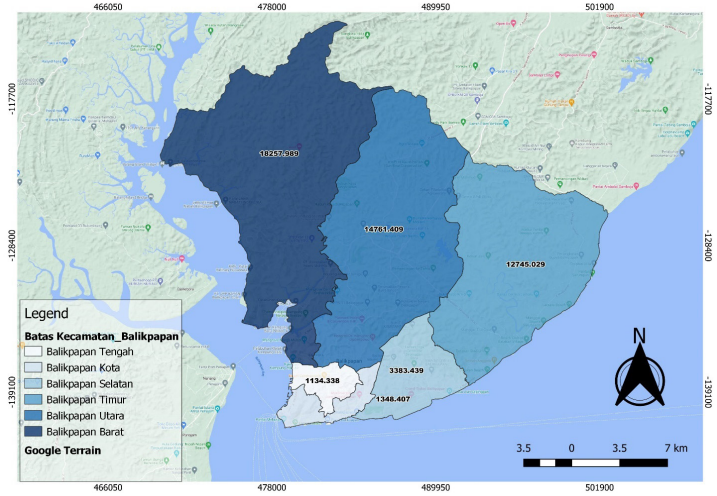
PENDAHULUAN

Bagi wilayah di sekitarnya, kota menjadi faktor pendorong pertumbuhan. Kota sebagai pusat pertumbuhan, memiliki sifat lebih dinamis yang dapat menunjang kehidupan sosial, ekonomi, dan budaya masyarakat. Perkembangan kota ditandai dengan beberapa hal, diantaranya meningkatnya kebutuhan lahan yang disebabkan aktivitas masyarakat dan pembangunan yang semakin masif. Pertumbuhan penduduk di perkotaan yang masif ditunjukkan dengan bertambah secara eksponensial baik disebabkan pertumbuhan alami maupun akibat arus urbanisasi. Pertumbuhan penduduk yang masif tersebut menimbulkan beberapa permasalahan pada perkotaan, salah satunya pada karakteristik alam, yang saat ini marak terjadi perubahan pada guna lahan (*land use)* atau tutupan lahan (*land cover)* sehingga menyebabkan permasalahan lainnya seperti perubahan suhu permukaan.

Kota Balikpapan terletak di barat daya Ibukota Provinsi Kalimantan Timur, Samarinda, dengan jarak sekitar 113 km. Terletak pada posisi silang jalur perhubungan nasional dan internasional menyebabkan Balikpapan memiliki posisi yang strategis. Hal ini berpengaruh pada perkembangan Balikpapan sebagai pusat perdagangan, jasa, dan industri baik di skala regional di Kalimantan Timur, dan juga berkembang sebagai salah satu sentra di Indonesia Tengah. Kalimantan Timur dan sebagian wilayah Kalimantan Selatan memiliki banyak kegiatan eksplorasi minyak dan gas serta batu bara, dengan Kota Balikpapan sebagai pusatnya. Kegiatan eksplorasi tersebut banyak melibatkan perusahaan asing sebagai kontraktor, menjadikan Kota Balikpapan menampung banyak warga asing.

Kota Balikpapan memiliki luas 50.330,57 hektar dan secara administratif terdiri atas 6 kecamatan yaitu Balikpapan Kota, Balikpapan Tengah, Balikpapan Utara, Balikpapan Timur, Balikpapan Selatan, dan Balikpapan Barat (Gambar 1). Kontur wilayah Kota Balikpapan didominasi oleh daerah perbukitan yakni sebesar 70%, sedangkan sisanya adalah wilayah tepi laut berupa daratan landai. Wilayah dataran tinggi cenderung berada di Kota Balikpapan bagian utara yaitu Kecamatan Balikpapan Utara, Balikpapan Timur, Balikpapan Tengah, dan Balikpapan Barat.

Daerah perbukitan ini memiliki fungsi sebagai kawasan lindung diantaranya hutan lindung kota, lokasi konservasi alam, dan hutan lindung Sungai Wain. Untuk dataran landai di Kecamatan Balikpapan Selatan, Balikpapan Kota dan Balikpapan Tengah difungsikan sebagai kawasan budidaya untuk perdagangan dan jasa serta pusat pemerintahan.



Gambar 1. Peta Administratif Kota Balikpapan

Jumlah penduduk Kota Balikpapan berdasarkan data sensus penduduk di tahun 2010 mencapai 559.196 jiwa, angka tersebut meningkat di tahun 2020 menjadi 688.318 jiwa. Terjadi peningkatan jumlah penduduk Kota Balikpapan sebesar 130.739 jiwa dalam kurun waktu sepuluh tahun (Badan Pusat Statistik Kota Balikpapan, 2022). Kepadatan penduduk terendah ada di Kecamatan Balikpapan Timur dengan nilai kepadatan 302 jiwa/km^2. Sedangkan kepadatan penduduk tertinggi ada pada Kecamatan Balikpapan Tengah dengan nilai kepadatan 8.159 jiwa/km^2. Artinya, tingkat kepadatan penduduk di Kota Balikpapan berdasarkan SNI 03-1733-2004 tentang Tata Cara

Perencanaan Lingkungan Permukiman di Perkotaan berada pada klasifikasi tinggi dan sangat tinggi. Tingginya kepadatan penduduk mengindikasikan tingginya kebutuhan ruang untuk melakukan berbagai aktivitas. Hal ini kemudian mendorong terjadinya perubahan penggunaan lahan yang masif di kawasan perkotaan, dari kawasan pertanian/lahan hijau menjadi kawasan terbangun untuk perdagangan dan jasa maupun industri. Tingkat perubahan penggunaan lahan di perkotaan membutuhkan energi yang cukup besar sehingga akan menghasilkan tingkat emisi yang juga meningkat. Banyaknya lahan terbangun menyebabkan penyerapan kapasitas dan konduktivitas panas menjadi tinggi, fenomena ini kemudian disebut dengan *urban heat island* (UHI).

Perbedaan kondisi suhu permukaan kawasan perkotaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah sekitarnya disebut sebagai UHI (Voogt & Oke, 2003). Terjadinya UHI dapat memberikan berbagai dampak negatif pada kualitas kehidupan perkotaan, diantaranya dampak lingkungan dan ekonomi, kenyamanan termal, pemanasan global, flora perkotaan, konsentrasi polutan, kesehatan manusia, kualitas udara, serta perubahan iklim (Firozjaei et al., 2020). Di Kota Balikpapan, selama beberapa tahun terakhir terjadi peningkatan suhu rata-rata. Data menunjukkan suhu rata-rata di Kota Balikpapan pada tahun 2011 sekitar 27,1^{0}C kemudian pada tahun 2018 meningkat hingga mencapai 31,6^{0}C (Badan Pusat Statistik Kota Balikpapan, 2018). Artinya selama 7 tahun terakhir terjadi peningkatan suhu permukaan yang cukup drastis di Kota Balikpapan. Hal ini juga diperjelas oleh data dari Badan Meteorologi dan Klimatologi Balikpapan yang menyatakan bahwa selama 30 tahun terakhir, perubahan iklim di Kota Balikpapan rata-rata mengalami peningkatan suhu permukaan sebesar 0,02 ^{0}C / tahun. Peningkatan suhu permukaan setiap tahunnya dapat meningkatkan risiko terjadinya berbagai bencana diantaranya kekeringan, kebakaran lahan, dan ketersediaan air bersih selama musim kemarau di masa mendatang. Peningkatan suhu permukaan di perkotaan biasanya disebabkan oleh semakin bertambahnya jumlah kendaraan bermotor yang menggunakan bahan bakar fosil, masifnya kegiatan industri di perkotaan, atau semakin bertambahnya lahan terbangun yang mengurangi luasan Ruang Terbuka Hijau (RTH). Kenaikan suhu perkotaan atau

yang lebih dikenal dengan istilah *urban heat island* merupakan suatu peristiwa yang menggambarkan kenaikan suhu perkotaan yang lebih tinggi dari suhu sekitarnya (Tursilowati, 2002).

Di Kota Balikpapan marak terjadi perubahan penggunaan lahan dari tahun 2004 hingga saat ini. Tren perubahan penggunaan lahan tersebut digunakan sebagai dasar penyusunan kebijakan dalam penurunan *urban heat island* di Kota Balikpapan. Dalam pengukuran suhu permukaan daratan perkotaan memanfaatkan teknologi penginderaan jauh dengan menggunakan sensor satelit *Landsat.* Adanya sensor satelit *Landsat* diperoleh citra *Landsat* yang memberikan gambaran permukaan Bumi. Suhu permukaan daratan diukur dari indeks kerapatan vegetasi dan bangunan pada citra *Landsat* di setiap periode waktu. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tren perubahan penggunaan lahan dan hubungannya dengan tren kenaikan suhu permukiman di Kota Balikpapan pada periode 2004 – 2020. Fenomena kenaikan suhu perkotaan perlu dicermati dengan seksama sehingga dapat menghasilkan strategi yang tepat guna menciptakan lingkungan perkotaan yang berkelanjutan, aman, nyaman, dan produktif menuju masyarakat 5.0.

PEMBAHASAN

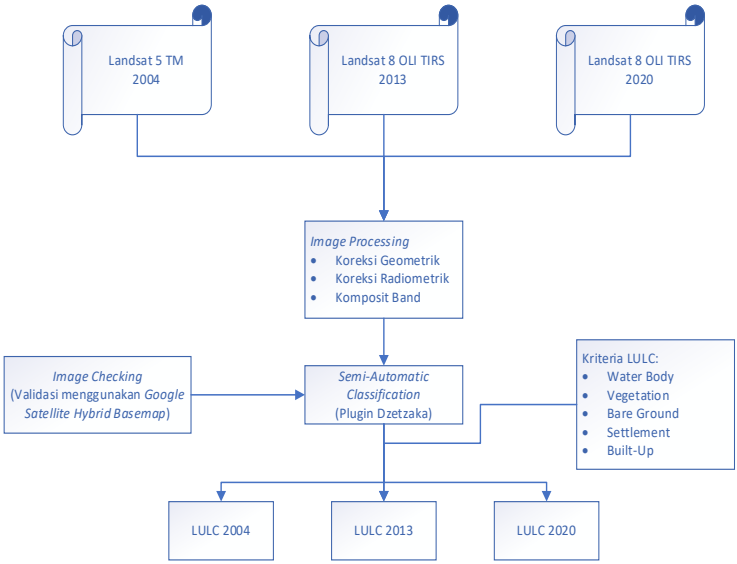
1. Tren Penggunaan Lahan Kota Balikpapan

Perencanaan tata ruang kota memuat kebijakan pemerintah baik pusat maupun daerah dalam menentukan prioritas penggunaan lahan guna mendukung pembangunan yang direncanakan. Penelitian ini menggunakan data primer jenis penggunaan lahan yang didapatkan dari hasil interpretasi citra satelit resolusi tinggi (CSRT), yakni Landsat 5 TM tahun 2004, Landsat 8 OLI TIRS tahun 2013 dan 2020, yang diolah dari *United States Geological Survey* (USGS.gov) sebagaimana tersaji pada Tabel 1**.** Citra yang sudah terkoreksi kemudian diinterpretasi secara visual dengan menggunakan perangkat lunak QGIS 3.22.4. Selama pemrosesan, gambar melewati beberapa proses. Tahap pertama adalah *pre-processing* data, yang terdiri dari koreksi radiometrik dan koreksi geometrik. Koreksi radiometrik berarti sensor meningkatkan ketajaman setiap piksel pada gambar citra.

Hal ini akan memudahkan proses penafsiran objek yang direkam dan menghasilkan data yang akurat dan sesuai dengan keadaan lapangan. Koreksi geometri menyelaraskan gambar agar sesuai dengan koordinat peta dunia yang sebenarnya (Sasky, Sobirin, & Wibowo, 2017). Setelah pra-pemrosesan selesai, dilanjutkan ke tahap pemrosesan gambar yang meliputi penajaman gambar dan pemotongan gambar sesuai dengan batasan lokasi studi. Kemudian melakukan transformasi citra untuk mendapatkan klasifikasi kelas penggunaan/tutupan lahan. Penggunaan dan penutupan lahan atau sering dikenal dengan istilah *land use land cover* (*LULC*) merupakan klasifikasi dari relief Bumi. Penggunaan lahan atau *land use* (LU) merupakan upaya terus menerus yang dilakukan manusia terhadap sumber daya lahan yang tersedia untuk memenuhi kebutuhannya, sehingga sifatnya dinamis sejalan dengan perkembangan kehidupan dan budaya manusia (Sitorus, 2016). Sementara penutupan lahan atau *land cover* (LC) adalah jenis hamparan obyek yang menutupi permukaan Bumi (misal tumbuhan, tanaman keras, badan air, dll). Data LULC sangat penting digunakan untuk mengetahui tren perubahan pemanfaatan lahan pada suatu daerah/wilayah sehingga dapat dilakukan kontrol terhadap lingkungan dan ekosistem yang di dalamnya terdapat beragam aktivitas manusia. Kelas penggunaan lahan dalam penelitian ini dibatasi pada 5 (lima) tutupan/penggunaan lahan yaitu: badan air, tutupan vegetasi, lahan/tanah kosong, permukiman dan lahan terbangun lainnya sebagaimana tersaji pada Gambar 2.

Tabel 1. Karakteristik Band/Spektral Data Landsat 8-OLI-TIRS dan 5-TM

	Nomor Band	Deskripsi	Panjang Gelombang	Resolusi
Landsat-8 OLI TIRS	Band 1	*Coastal/Aerosol*	0.433-0.453 µm	30 Meter
	Band 2	*Visible Blue*	0.450-0.515 µm	30 Meter
	Band 3	*Visible Green*	0.525-0.600 µm	30 Meter
	Band 4	*Visible Red*	0.630-0.680 µm	30 Meter
	Band 5	*Near-Infrared*	0.845-0.885 µm	30 Meter
	Band 6	*Short Wavelength Infrared*	1.56-1.66 µm	30 Meter
	Band 7	*Short Wavelength Infrared*	2.10-2.30 µm	60 Meter
	Band 8	*Panchromatic*	0.50-0.68 µm	15 Meter
	Band 9	*Cirrus*	1.36-1.39 µm	30 Meter
	Band 10	*Long Wavelength Infrared/ Thermal*	10.3-11.3 µm	100 Meter
	Band 11	*Long Wavelength Infrared*	11.5-12.5 µm	100 Meter
Landsat-5 TM	Band 1	*Visible Blue*	0.45-0.52 µm	30 Meter
	Band 2	*Visible Green*	0.52-0.60 µm	30 Meter
	Band 3	*Visible Red*	0.63-0.69 µm	30 Meter
	Band 4	*Near-Infrared*	0.76-0.90 µm	30 Meter
	Band 5	*Short Wavelength Infrared*	1.55-1.75 µm	30 Meter
	Band 6	*Thermal*	10.4-12.3 µm	120 Meter
	Band 7	*Short Wavelength Infrared*	2.08-2.35 µm	30 Meter



Gambar 2. Konsep Penginderaan Jauh (Spatio Temporal – LULC) Menggunakan QGIS

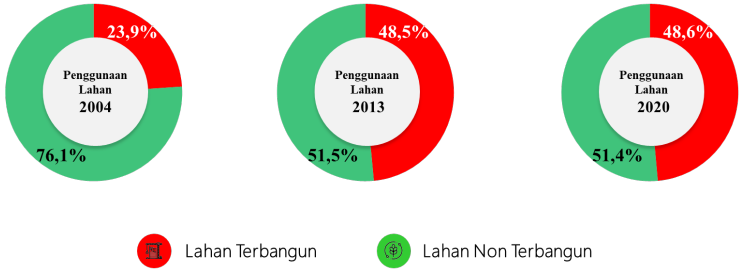
Perkembangan suatu kota dapat dilihat dengan sangat baik dalam perkembangan tata ruang, karena kota merupakan pusat konsentrasi penduduk dengan kegiatan ekonomi, sosial budaya, dan administrasi negara yang beragam (Adisasmita, 2006). Pola persebaran pembangunan perkotaan yang konsentris merupakan kecenderungan alamiah setiap orang untuk berada sedekat mungkin dengan pusat kota (Mirsa, 2012). Kota Balikpapan merupakan salah satu pusat industri di pesisir timur Kalimantan yang memiliki daya tarik bagi kaum pendatang. Badan Pusat Statistik Kota Balikpapan mencatat ada penambahan jumlah penduduk yang cukup signifikan. Dalam kurun waktu 10 tahun sejak 2010 hingga 2020, jumlah penduduk Balikpapan bertambah sekitar 130.739 jiwa, dimana hasil sensus 2020 adalah 688.318. Penyumbang utama pertambahan penduduk tersebut adalah migrasi penduduk dari daerah lain

ke Kota Balikpapan. Sumbangan dari migrasi ini lebih signifikan dibandingkan dengan pertambahan penduduk alami melalui kelahiran.

Data Citra Landsat pada tahun 2004 hingga 2020 menunjukkan tingkat perkembangan lahan terbangun mengalami kenaikan yang signifikan. Selama 16 tahun perkembangan lahan terbangun mengalami kenaikan sebesar 24,6% sebagaimana tersaji pada Tabel 2 dan Gambar 3. Perkembangan lahan terbangun yang terjadi di suatu wilayah tentu disebabkan oleh berbagai faktor pendorong.

Tabel 2. Perkembangan Penggunaan Lahan Terbangun dan Non Terbangun di Kota Balikpapan

No	Penggunaan Lahan	Luas (ha)					
		2004	%	2013	%	2020	%
1	Terbangun	12361,7	23,9	25040,7	48,5	25081,7	48,6
2	Non Terbangun	39279,7	76,1	26600,7	51,5	26559,7	51,4
Luas Kota Balikpapan		51641,4	100	51641,4	100	51641,4	100



Gambar 3. Perbandingan Penggunaan Lahan di Kota Balikpapan Tahun 2004, 2013, dan 2020

Perubahan pola penggunaan lahan di Balikpapan merupakan fenomena peningkatan kebutuhan lahan sebagai akibat dari pembangunan ekonomi dan pertumbuhan penduduk (Tabel 3). Pada tahun 2004, pola penggunaan lahan terbangun mayoritas berada di Kecamatan Balikpapan Utara seluas 4.917 hektar atau 33% dari total luas wilayah kecamatan. Posisi kedua

ditempati oleh Kecamatan Balikpapan Barat dengan luas lahan terbangun mencapai 4.561 hektar atau 24,9% dari luas wilayah kecamatan. Tahun 2013 terjadi peningkatan luasan lahan terbangun yang mayoritas berada di Kecamatan Balikpapan Timur dan Balikpapan Utara. Pesatnya perkembangan industri, perdagangan, dan jasa di Kecamatan Balikpapan Barat memicu meningkatnya lahan terbangun. Luas lahan terbangun di kecamatan tersebut pada tahun 2020 seluas 7.742 hektar atau 42% dari luas wilayah kecamatan. Hal ini menandakan pergeseran pemanfaatan ruang yang sebelumnya terpusat di Kecamatan Balikpapan Utara, kini beralih ke Kecamatan Balikpapan Barat.

Pesatnya perkembangan Kawasan Perkotaan Balikpapan disebabkan oleh beberapa hal, salah satunya adalah penetapan Kecamatan Balikpapan Barat sebagai Kawasan Industri Kariangau (KIK). Kawasan industri tersebut adalah bagian dari Kawasan Strategis Provinsi (KSP) yang terintegrasi dengan pengembangan Kawasan Industri Buluminung di Penajam Paser Utara. Kawasan tersebut menempati area seluas 3.565 hektar pada sebagian wilayah yang terletak di Kawasan Teluk Balikpapan. Pengembangan Kawasan industri Kariangau diarahkan untuk menggerakkan sektor ekonomi wilayah melalui kegiatan industri pengolahan batubara, gas, minyak bumi, minyak sawit, kopi, karet, makanan, perikanan, meubel, dan lain-lain. Tujuan dari pembangunan kawasan tersebut adalah agar dapat memberi nilai tambah pada setiap komoditi yang dihasilkan di Provinsi Kalimantan Timur. Sehingga pemasaran produk primer yang semula hanya menjual bahan baku beralih menjadi produk sekunder atau tersier yang siap digunakan untuk kepentingan rumah tangga maupun industri. Pada Kawasan Industri Kariangau telah terintegrasi dengan terminal pelabuhan peti kemas (sebagai jalur angkut laut) dan *freeway* (sebagai jalur angkut darat). Sehingga KIK menjadi kawasan yang sangat strategis dan potensial untuk menunjang dan melayani kebutuhan kegiatan industri di wilayah tengah dan timur Indonesia. Hal ini juga didukung dengan letak posisi geostrategis pada Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI) II yang memiliki akses tinggi pada wilayah pelayanannya hingga jangkauan internasional.

Tabel 3. Perkembangan Penggunaan Lahan Terbangun dan Non Terbangun Per Kecamatan di Kota Balikpapan

Luas Penggunaan Lahan Tahun 2004 (dalam Ha)							
Penggunaan Lahan	Kecamatan						Total
	Balikpapan Barat	Balikpapan Kota	Balikpapan Selatan	Balikpapan Tengah	Balikpapan Timur	Balikpapan Utara	
Badan Air	1224.995	6.121	37.737	9.815	1097.872	965.545	3342.085
Lahan Kosong	102.648	31.425	395.174	25.207	458.411	134.444	1147.309
Lahan Terbangun	3999.308	528.907	1291.598	487.712	2270.349	4253.52	12831.39
Permukiman	562.346	582.218	322.491	303.948	246.11	664.434	2681.547
Tutupan Vegetasi	12368.69	199.736	1336.439	307.656	8672.287	8743.466	31628.28
(kosong)							
Total Keseluruhan	**18257.99**	**1348.407**	**3383.439**	**1134.338**	**12745.03**	**14761.41**	**51630.61**
Luas Penggunaan Lahan Tahun 2013 (dalam Ha)							
Penggunaan Lahan	Kecamatan						Total
	Balikpapan Barat	Balikpapan Kota	Balikpapan Selatan	Balikpapan Tengah	Balikpapan Timur	Balikpapan Utara	
Badan Air	2969.192	127.698	522.879	138.154	2079.881	3109.568	8947.372
Lahan Kosong	37.19	4.86	31.239	6.663	58.8	42.316	181.068
Lahan Terbangun	2921.363	814.528	142.515	656.014	4597.499	3838.322	12970.24
Permukiman	1692.833	288.195	2355.723	260.822	1617.001	2847.983	9062.557
Tutupan Vegetasi	10637.41	113.126	331.083	72.685	4391.848	4923.22	20469.37
(kosong)							
Total Keseluruhan	**18257.99**	**1348.407**	**3383.439**	**1134.338**	**12745.03**	**14761.41**	**51630.61**
Luas Penggunaan Lahan Tahun 2020 (dalam Ha)							
Penggunaan Lahan	Kecamatan						Total
	Balikpapan Barat	Balikpapan Kota	Balikpapan Selatan	Balikpapan Tengah	Balikpapan Timur	Balikpapan Utara	
Badan Air	32.96				317.044	222.564	572.568
Lahan Kosong	156.144	130.27	219.358	181.16	96.534	138.313	921.779
Lahan Terbangun	7485.488	669.039	1322.496	262.226	5552.695	2399.172	17691.12
Permukiman	256.633	156.947		246.553	1037.583	1131.672	2829.388
Tutupan Vegetasi	10326.76	392.151	1841.585	444.399	5741.173	10869.69	29615.76
(kosong)							
Total Keseluruhan	**18257.99**	**1348.407**	**3383.439**	**1134.338**	**12745.03**	**14761.41**	**51630.61**

Ruang yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan aktivitas manusia akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan ekonomi dan sosial. Semakin dekat dengan pusat kota, semakin cepat perubahan penggunaan lahan, dan sebaliknya pada daerah yang jauh dari pusat kota, perubahan yang terjadi dapat diminimalisir. Sitorus (2016) mengungkapkan bahwa perubahan fungsi lahan pertanian disebabkan oleh gencarnya kegiatan yang berorientasi ekonomi untuk keuntungan jangka pendek, tanpa mempertimbangkan keuntungan yang hilang dari konversi lahan tersebut.

Pola perubahan penggunaan lahan terjadi akibat adanya perubahan dari satu jenis penggunaan lahan ke jenis penggunaan lahan lainnya pada lokasi yang sama. Persaingan pemanfaatan ruang memudahkan terjadinya transformasi pemanfaatan ruang dari satu penggunaan ke penggunaan lainnya. Perubahan tersebut dalam pelaksanaan pembangunan tidak dapat dihindari yang disebabkan oleh dua hal. Salah satunya terkait dengan kebutuhan untuk memenuhi kebutuhan penduduk yang terus bertambah dan yang lainnya terkait dengan meningkatnya permintaan akan kualitas hidup yang lebih baik. Pertumbuhan penduduk dan peningkatan standar hidup menyebabkan permintaan untuk *real estate* seperti perumahan, komersial, tempat rekreasi dan fasilitas umum meningkat. Keberadaan lahan yang cocok untuk pengembangan sangat terbatas dalam memenuhi kebutuhan penduduk untuk menciptakan ruang baru untuk tempat tinggal dan kegiatan lainnya.

Tren penggunaan lahan di Kota Balikpapan memperlihatkan lahan pertanian baik kebun/ladang dan sawah dominan berubah fungsi menjadi kawasan terbangun (Tabel 4). Perubahan lahan untuk bangunan terjadi di pusat kota, kemudian mengarah ke selatan dan timur kota. Pada tahun 2004 hingga 2013 terjadi penurunan luas tutupan vegetasi di Kota Balikpapan sebesar 16.636,6 hektar (47%). Hal ini sebanding dengan luas lahan terbangun yang meningkat 200% menjadi 24.756,3 hektar. Peningkatan luas badan air di tahun 2013 meningkat menjadi 7967,6 hektar (160%). Perubahan tutupan lahan menjadi badan air terjadi pada area di sekitar Waduk Manggar. Hal ini disebabkan pada periode tahun 2006-2012 intensitas hujan di Kota Balikpapan cukup tinggi yaitu 2.212,8 mm dengan rata-rata curah hujan bulanan sebesar 172 mm (Gunaifi, 2017). Kondisi ini

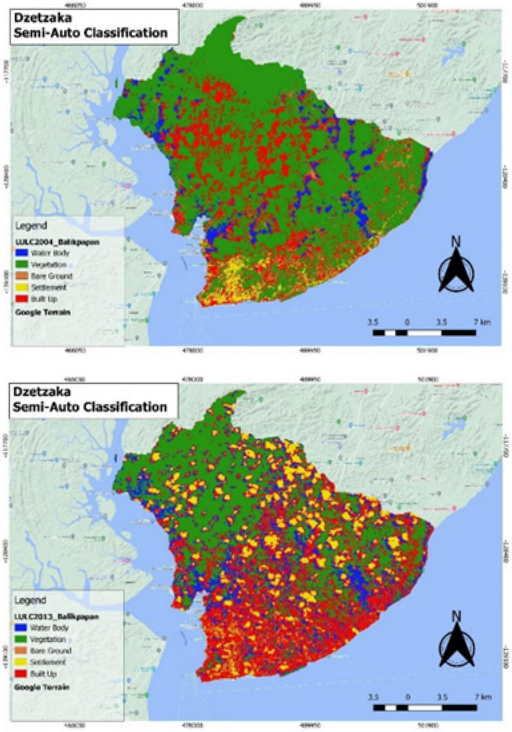
menimbulkan banyak genangan pada area pertanian lahan kering/campur dan semak yang beralih fungsi menjadi badan air. Namun kondisi tersebut tidak berlangsung lama yaitu sejak tahun 2013 area badan air di sekitar Waduk Manggar mengalami penurunan kuantitas air yang akhirnya diinterpretasi sebagai lahan terbuka.

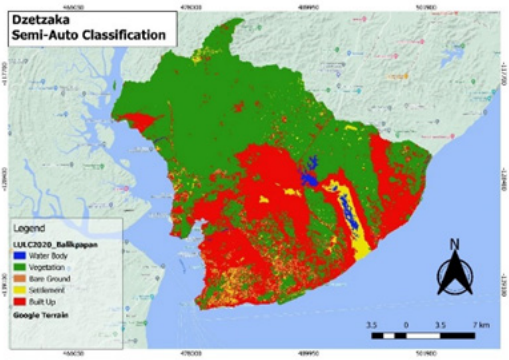
Proses densifikasi permukiman yang terus berlangsung adalah pengakuan akan kebutuhan ruang yang semakin meningkat di kawasan perkotaan (Giyarsih, 2010). Penggunaan lahan erat kaitannya dengan aktivitas manusia dan sumberdaya lahan. Segala bentuk penggunaan lahan merupakan hasil usaha manusia yang terus menerus untuk memenuhi kebutuhannya. Oleh karena itu, penggunaan lahan bersifat dinamis dan mengikuti perkembangan kehidupan manusia. Tata guna lahan merupakan salah satu faktor kunci yang dapat mempengaruhi perkembangan struktur perkotaan/wilayah. Tata guna lahan merupakan bentuk dasar dari struktur perkotaan yang mencerminkan struktur sosial ekonomi. Di satu sisi, perubahan kondisi sosial ekonomi dapat mempengaruhi bentuk atau pola penggunaan lahan di suatu kota, dan di sisi lain penggunaan lahan merupakan tempat dan konsentrasi aktivitas perkotaan dan bagi perkembangan sosial kota di masa depan.

Tabel 4. Tren Penggunaan Lahan di Kota Balikpapan

Kelas Penggunaan Lahan	Luas (ha) pada tahun		
	2004	2013	2020
Badan Air	3046,1	7957,6	498,8
Tutupan Vegetasi	35098,9	18462,3	25173,6
Tanah Kosong	1134,7	180,8	887,3
Permukiman	1594	6294,3	6315,3
Lahan terbangun lainnya	10767,7	18746,4	18766,4
Luas Kota Balikpapan	51641,4	51641,4	51641,4

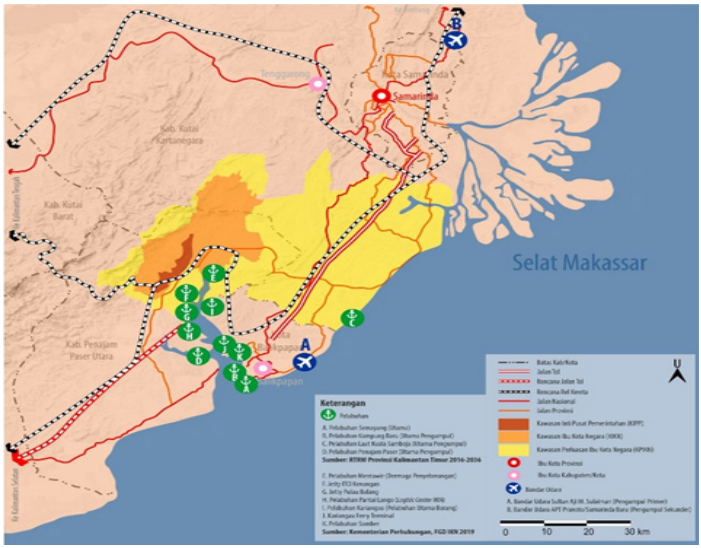
Menyusutnya lahan produktif perkotaan merupakan ancaman serius dan sulit dihindari. Efek yang ditimbulkannya bersifat tetap, kumulatif, dan progresif. Efek tetap adalah lahan yang telah beralih fungsi tidak dapat dikembalikan lagi seperti semula. Sementara efek kumulatif adalah akumulasi produksi yang menurun setiap tahun, sedangkan efek progresif adalah peningkatan kehilangan produksi pangan dari tahun ke tahun (Irawan, 2005). Sebaran spasial tren penggunaan lahan yang terjadi pada Kota Balikpapan dalam kurun waktu 2004 – 2020 disajikan pada Gambar 4.



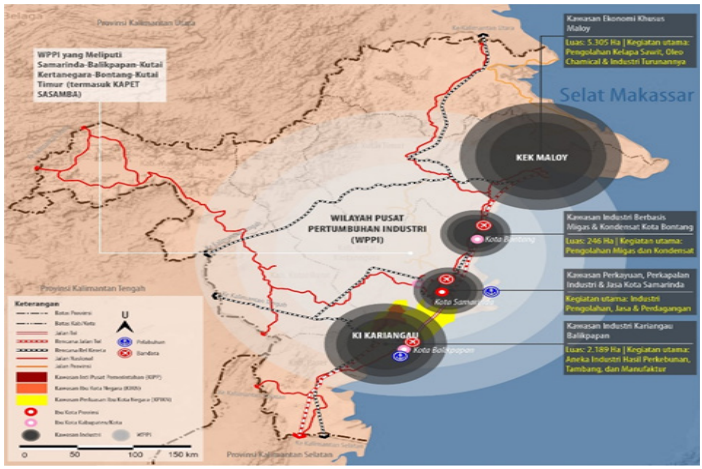


Gambar 4. Sebaran Spasial Tren Penggunaan Lahan di Kota Balikpapan Tahun 2004, 2013, dan 2020

Balikpapan merupakan pintu gerbang wilayah Indonesia Timur. Hal ini sesuai dengan posisinya sebagai Pusat Kegiatan Nasional (PKN) dan potensinya sebagai kota jasa, kota transit dengan fasilitas pelayanan dan transportasi. Sebagai pintu gerbang wilayah/regional, posisi Balikpapan diperkuat oleh keberadaan bandara internasional atau pelabuhan utama dan pelabuhan *feeder* regional yang lengkap dibandingkan dengan wilayah lain di Kalimantan dan Kawasan Indonesia Timur. Hal ini sesuai dengan rencana tata ruang wilayah (RTRW) Provinsi Kalimantan Timur 2016-2036 sebagaimana tersaji pada Gambar 5. Kota Balikpapan juga merupakan pusat utama kegiatan Kalimantan Timur. Mengingat kota ini merupakan jalur distribusi dan basis penjualan antara provinsi/kota dengan Kalimantan Timur sesuai dengan yang tercantum dalam Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional 2015 -2035 sebagaimana tersaji pada Gambar 6**.**

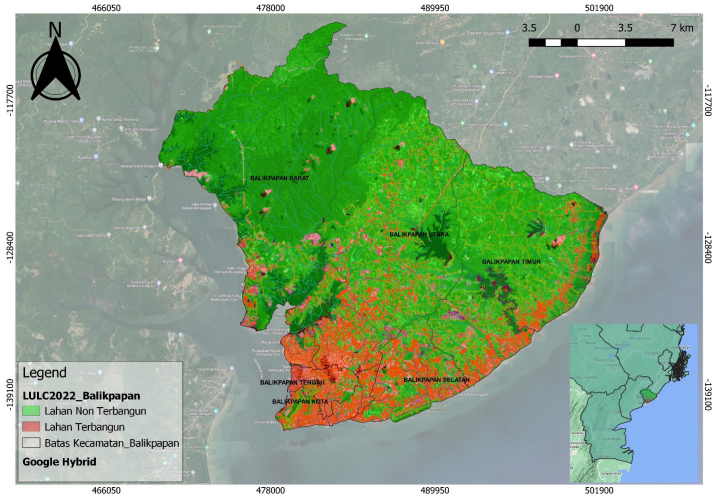


Gambar 5. Jaringan Transportasi Regional Kalimantan Timur dimana Kota Balikpapan sebagai Gerbangnya



Gambar 6. Kawasan Industri di Kalimantan Timur dimana Kota Balikpapan sebagai *Outlet*-nya

Posisi strategis dan keunggulan komparatif Kota Balikpapan membentuk visi pembangunan perkotaan masa depan sebagai pusat jasa, perdagangan, dan industri. Implementasinya adalah ditetapkannya Kawasan Industri (KI) Kariangau Balikpapan di Kecamatan Balikpapan Barat. Fakta empiris menunjukkan industri–industri besar yang menjadi roda penggerak perekonomian di Kota Balikpapan terkonsentrasi di sisi timur-selatan kota dan memacu pertumbuhan lahan terbangun disekitarnya (Gambar 7). Hal ini sesuai dengan yang dikemukakan oleh Hudalah dan Firman (2012) bahwa perkembangan industri memainkan peran penting dalam transformasi spasial kota maupun wilayah pinggirannya.

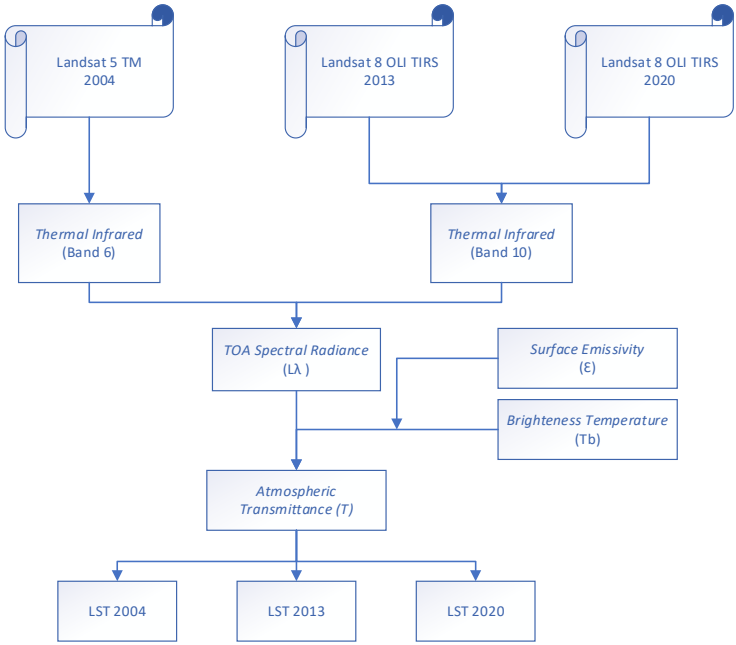


Gambar 7. Peta Sebaran Lahan Terbangun dan Non Terbangun di Kota Balikpapan

2. Tren Kenaikan Suhu Permukaan Kota Balikpapan

Data yang digunakan untuk analisis *Land Surface Temperature* (LST) yakni Citra Landsat 5 TM tahun 2004, Landsat 8 OLI TIRS tahun 2013 dan 2020. Data tersebut kemudian diolah dengan bantuan alat analisis berupa *software* QGIS 3.22.4. Teknik yang digunakan adalah penginderaan jauh, yaitu mengubah

nilai digital citra satelit LANDSAT setiap periode menjadi nilai suhu permukaan lokal. *Land Surface Temperature* (LST) adalah pengukuran suhu yang terkait dengan lapisan yang paling dekat dengan Bumi yang ditangkap oleh satelit (Voogt & Oke, 2003). Berbagai manfaat dari penggunaan LST diantaranya untuk menentukan emisi gas rumah kaca, pemetaan kawasan panas Bumi (geothermal), mengetahui tingkat kelembaban tanah (*soil moisture*) serta penentuan *urban heat island* pada suatu tutupan lahan/penggunaan lahan tertentu dan sebagainya (Hilmy, Abyan, Susandi, Damanik, & Widdyusuf, 2021). Sebelum dilakukan perhitungan nilai LST, terlebih dahulu dilakukan perhitungan koreksi radiometrik dengan cara mengkonversi nilai digital menjadi nilai *TOA radiance* (Sejati, Buchori, & Rudiarto, 2019). Langkah tersebut dilakukan sebagai salah satu cara untuk melakukan validasi data citra yang akan digunakan. Kalibrasi Radiometrik merupakan langkah pertama yang harus dilakukan saat kita mengolah data citra satelit. Tujuan utama dari kalibrasi radiometrik ini adalah untuk mengubah data pada citra yang (pada umumnya) disimpan dalam bentuk *Digital Number* (DN) menjadi *radiance* dan/atau *reflectance*, bisa juga ke *brightness temperature* (untuk kanal Termal Infra Red). Citra satelit resolusi tinggi Landsat 5 dan Landsat 8 memiliki perbedaan kualitas pembacaan panas Bumi yang berbeda-beda. Masing – masing memiliki nilai pita TIRS band yaitu band 10 untuk Landsat 8 OLI dan band 6 untuk Landsat 5 T M. Data pita TIRS dapat dikonversi dari pancaran spektral ke puncak atmosfer (TOA Spectral Radience) oleh konstanta termal yang disediakan dalam file metadata citra. Data tersebut kemudian diolah menggunakan perangkat lunak QGIS untuk menghasilkan suhu permukaan Kota Balikpapan pada tahun 2004, 2013, dan 2020. Berikut merupakan tahapan analisis *Land surface temperature* (LST) yang tersaji pada Gambar 8.



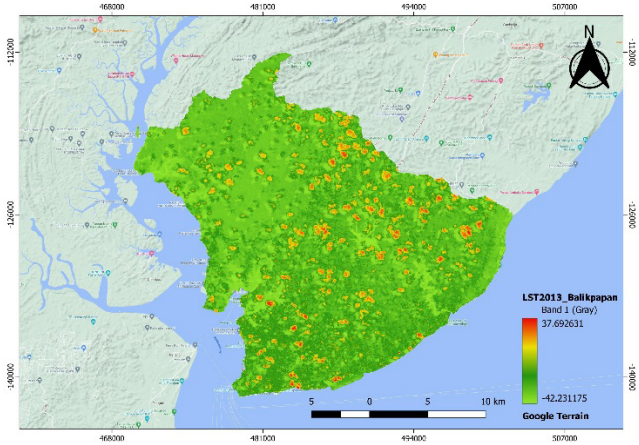
Gambar 8. Metode Penginderaan Jauh *Spatio Temporal – land surface temperature* (LST) Menggunakan QGIS

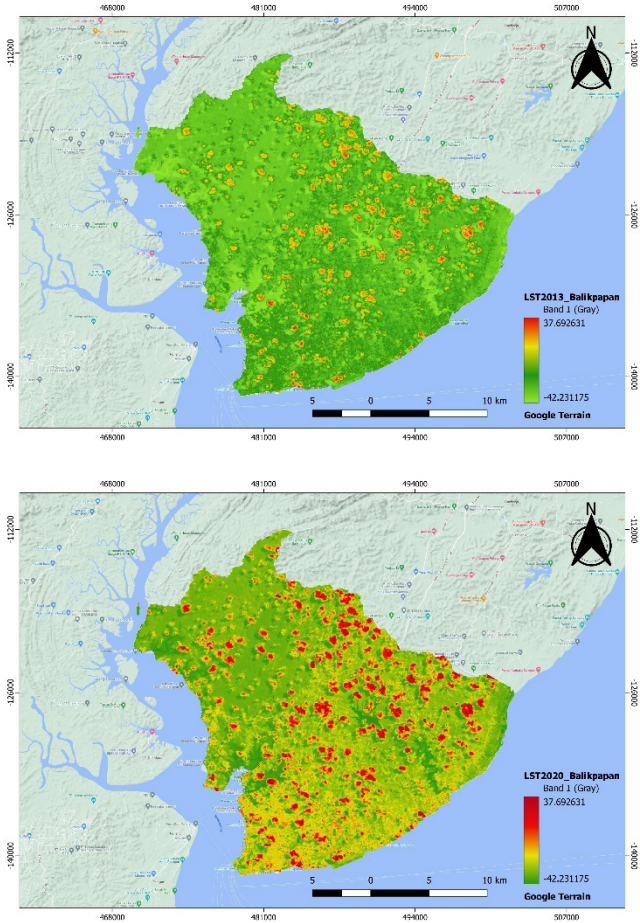
Berdasarkan hasil pengukuran suhu permukaan dengan analisis penginderaan jauh citra Landsat pada tahun 2004, 2013, dan 2020, dapat menunjukkan distribusi suhu permukaan dari tahun 2004 hingga 2020 di Kota Balikpapan. Selama tahun 2004, sebaran suhu permukaan di wilayah Balikpapan berkisar antara 16 hingga 33,12°C, dengan suhu permukaan rata-rata 20°C. Selama tahun 2013, sebaran suhu permukaan di wilayah Balikpapan berkisar antara 16 hingga 37,69°C, dengan suhu permukaan rata-rata 25°C. Selama tahun 2020, wilayah Balikpapan memiliki sebaran suhu permukaan pada kisaran 16-37,69°C dan suhu permukaan rata-rata 26°C. Suhu permukaan cenderung naik dari setiap periode (Tabel 5). Hal ini ditunjukkan dengan peningkatan suhu permukaan rata-rata dan peningkatan proporsi daerah dengan suhu permukaan tinggi. Kutub panas terbentuk ketika

beberapa vegetasi diganti dengan aspal dan beton untuk jalan, gedung dan struktur lainnya diperlukan untuk mendukung pertumbuhan penduduk. Permukaan yang diganti tersebut dapat menyerap dan memantulkan lebih banyak panas dari matahari, meningkatkan suhu permukaan kota. Secara spasial, suhu permukaan Kota Balikpapan tinggi berada di pusat kota (sisi selatan dekat pantai) dan mengarah ke bagian timur-utara (Gambar 9). Semakin jauh suatu wilayah dari pusat kota, maka semakin cepat suhu akan turun. Perubahan tata guna lahan yang tidak terkendali menyebabkan perubahan kualitas lingkungan, termasuk suhu perkotaan.

Tabel 5. Perbandingan Luas Lahan Terbangun dengan Rata-Rata Suhu Permukaan

No	Penggunaan Lahan	Luas (ha) dan suhu permukaan rata-rata								
		2004	%	°C	2013	%	°C	2020	%	°C
1	Terbangun	12361,7	23,9	20	25040,7	48,5	25	25081,7	48,6	26
2	Non Terbangun	39279,7	76,1		26600,7	51,5		26559,7	51,4	
Luas wilayah		51641,4	100		51641,4	100		51641,4	100	

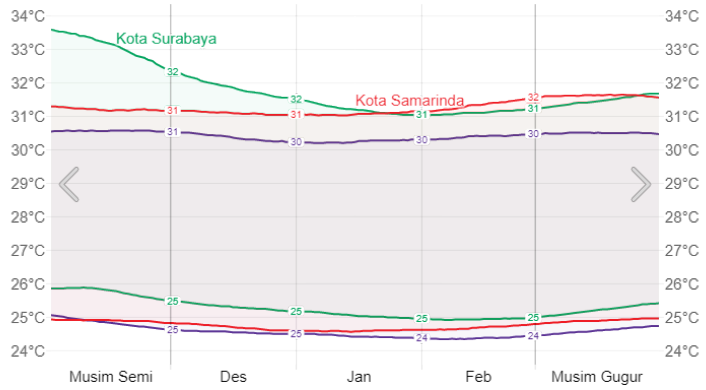




Gambar 9. Peta Perubahan *Land Surface Temperature* (LST) Tahun 2004-2020

Sisi selatan hingga ke arah utara Kota Balikpapan menunjukkan kenaikan suhu permukaan yang cukup signifikan (merah). Hal ini dikarenakan pada area tersebut menjadi konsentrasi dari aktivitas perkotaan mulai dari permukiman,

perdagangan jasa dan industri serta mobilitas kendaraan sangat tinggi. Meningkatnya suhu perkotaan berkorelasi positif dengan kepadatan kota dan berkorelasi negatif dengan kepadatan vegetasi (Fatimah & Sobirin, 2015). Setiap penggunaan lahan mempengaruhi perubahan suhu. Hal ini dikarenakan memiliki jenis material dan aktivitas yang berbeda untuk setiap penggunaan lahan (Pamungkas, 2020). Kehadiran aktivitas industri dan transportasi antropogenik, serta keberadaan bangunan yang memancarkan panas lebih cepat daripada ruang terbuka hijau, merupakan salah satu faktor pemicu terjadinya *urban heat island* (Adiningsih, Soenarmo, & Mujiasih, 2001). Bila dibandingkan dengan kota-kota lain di Indonesia seperti Surabaya dan Samarinda, suhu permukaan di Kota Balikpapan relatif masih lebih rendah (Gambar 10). Hal ini dikarenakan masih banyaknya tajuk hijau dengan luasan mencapai 25.173,6 hektar atau 48% dari total luas wilayah Kota Balikpapan.



Sumber: id.weatherspark.com, 2021

Gambar 10. Perbandingan *Land Surface Temperature* (LST) Kota Balikpapan dengan Kota Surabaya dan Kota Samarinda Tahun 2021

Pemanasan kota ini dapat mempengaruhi kenyamanan warga dalam melakukan berbagai aktivitas di dalam pusat kota, khususnya aktivitas di luar ruangan. Suhu yang lebih hangat dapat membuat kota menjadi kurang layak huni. Pertumbuhan penduduk yang cepat dan perluasan wilayah perkotaan yang terkait telah diakui sebagai penyebab utama iklim perubahan di kota-kota negara berkembang (Zhao, 2018). Fenomena ini dapat menyebabkan penumpukan panas, perubahan pembentukan ozon, dan dalam kasus yang parah, dapat menyebabkan gangguan kesehatan bagi penduduk perkotaan (Chun & Guldmann, 2014). Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat menjelaskan bahwa cuaca panas dapat menyebabkan ketidaknyamanan umum, kesulitan pernapasan, kram panas dan kelelahan, stroke panas non-fatal, dan kematian terkait panas. Beberapa penelitian juga menemukan bahwa suhu yang lebih hangat dapat meningkatkan tingkat ketegangan dan stres seseorang. Fenomena UHI ini juga berdampak pada tingginya biaya konsumsi energi. Suhu yang lebih hangat membuat ketergantungan pada AC meningkat, yang berarti pengeluaran rumah tangga dan biaya operasional gedung untuk konsumsi energi juga meningkat. Studi menunjukkan bahwa kebutuhan pendinginan listrik meningkat 1,5% menjadi 2% untuk setiap kenaikan suhu 0,6°C.

Kota-kota maju seperti di Eropa dan Amerika yang terkena gelombang panas beberapa waktu lalu telah menerapkan konsep *green-blue network*. Ruang–ruang kota disulap menjadi hijau dengan berbagai bentuk taman dan fungsinya. Jutaan pohon ditanam agar suhu menjadi lebih sejuk. Air mancur dibangun agar kelembapan udara terjaga. Semakin rapat pepohonan maka akan dapat mengurangi energi radiasi matahari. Pada siang hari dapat mengurangi suhu udara yang tinggi, sementara malam hari pepohonan tersebut berperan menahan panas, sehingga suhu udara di bawah permukaan Bumi menjadi lebih hangat dibandingkan suhu udara di atas permukaan tanah terbuka. Pohon berperan dalam menurunkan suhu udara melalui beberapa mekanisme antara lain mekanisme evatransporasi dengan cara pelepasan air dari permukaan daun, pembayangan (*canopy effect*) dengan memayungi daerah bawahnya, dan mekanisme selimut dengan cara menghalangi pertukaran panas dengan daerah sekitarnya (Wonorahardjo, 2012).

KESIMPULAN

Perubahan pola penggunaan lahan di Balikpapan merupakan fenomena peningkatan kebutuhan lahan sebagai akibat dari pembangunan ekonomi dan pertumbuhan penduduk. Pada tahun 2004 hingga 2020, perkembangan lahan terbangun meningkat secara signifikan. Selama 16 tahun terakhir, pembangunan perkotaan meningkat sebesar 24,6%. Tren penggunaan lahan di Kota Balikpapan menunjukkan bahwa baik kebun/sawah maupun lahan persawahan yang dominan telah berubah fungsinya menjadi kawasan perkotaan/terbangun. Perkembangan Kota Balikpapan yang pesat merupakan hasil dari perannya selama ini. Kota Balikpapan berperan sebagai Pusat Kegiatan Nasional (PKN) dan juga merupakan pintu gerbang untuk pembangunan wilayah pada Indonesia Bagian Timur. Perubahan penggunaan lahan yang terjadi secara masif dapat menyebabkan perubahan kualitas lingkungan. Salah satunya adalah suhu kota. Selama tahun 2004, sebaran suhu permukaan di wilayah Balikpapan berkisar antara 16 hingga 33,12°C, dengan suhu permukaan rata-rata 20°C. Selama tahun 2013, sebaran suhu permukaan di wilayah Balikpapan berkisar antara 16 hingga 37,69°C, dengan suhu permukaan rata-rata 25°C. Pada tahun 2020, sebaran suhu permukaan di wilayah Balikpapan berkisar antara 16 hingga 37,69°C, dengan suhu permukaan rata-rata 26°C. Sisi selatan sisi utara Kota Balikpapan menunjukkan peningkatan suhu permukaan yang signifikan (merah). Wilayah ini disebabkan oleh konsentrasi aktivitas perkotaan, mulai dari pemukiman, perdagangan jasa dan industri hingga tingkat pergerakan kendaraan yang sangat tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

Adiningsih, E.S., Soenarmo, S.H., & Mujiasih, S. (2001). Kajian perubahan distribusi spasial suhu udara akibat. *Jurnal Lapan,* 29–44.

Adisasmita, R. (2006). *Pembangunan pedesaan dan perkotaan*. Yogyakarta: Graha Ilmu.

Badan Pusat Statistik Kota Balikpapan. (2018). Kota Balikpapan dalam Angka Tahun 2018. Retrieved from https://balikpapankota.bps.go.id/publication/2018/08/16/8df63ffd73378cb97b4fc3eb/kota-balikpapan-dalam-angka-2018.html

Badan Pusat Statistik Kota Balikpapan. (2022). Kota Balikpapan dalam Angka Tahun 2022. Retrieved from https://balikpapankota.bps.go.id/publication.html

Chun, B., & Guldmann, J. (2014). Landscape and urban planning spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities. *Landscape and Urban Planning,* 125, 76–88. doi:10.1016/j.landurbplan.2014.01.016.

Fatimah, R. N., & Sobirin. (2015). U*rban heat island* Kota Surabaya. Geoedukasi, 4(2), 46–69.

Firozjaei, Karimi, M., Fathololoumi, S., Kiavarz, M., Arsanjani, J.J., & Alavipanah, S.K. (2020). Modelling surface heat island intensity according to differences of biophysical characteristics: a case study of Amol City, Iran. *Ecological Indicators,* 109 (October 2019), 105816. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105816.

Giyarsih, S.R. (2010). Pola spasial transformasi wilayah di koridor Yogyakarta-Surakarta. *Forum Geografi,* 24(1), 28–38.

Gunaifi, A. (2017). *Dinamika perubahan tutupan/penggunaan lahan di Kota Balikpapan tahun 1990-2016*. Universitas Mulawarman.

Hilmy, Abyan, Susandi, A., Damanik, B.M., & Widdyusuf, L. (2021). Analisis perubahan land surface temperature akibat kebakaran hutan dan lahan di Kota Pekanbaru Riau tahun 2000 dan 2020. *Jurnal Pendidikan dan Ilmu Geografi,* 6(1), 74–80. doi: 10.21067/jpig.v6i1.5197.

Hudalah, D., & Firman, T. (2012). Beyond property: Industrial estates and post-suburban transformation in Jakarta metropolitan region. *Cities,* 29 (1), 40–48. doi: 10.1016/j.cities.2011.07.003.

id.weatherspark.com (2021). Bandingkan iklim dan cuaca di Kota Surabaya, Kota Samarinda, dan Kota Balikpapan. Retrieved from https://id.weatherspark.com/compare/y/124626~131259~130278/Perbandingan-Cuaca-Rata-rata-di-Kota-Surabaya-Kota-Samarinda-dan-Kota-Balikpapan

Irawan, B. (2005). Konversi lahan sawah: Potensi dampak, pola pemanfaatannya, dan faktor determinan. *Forum Penelitian Agro Ekonomi,* 23(1),1–18.

Mirsa, R. (2012). *Elemen tata ruang kota*. Yogyakarta: Graha Ilmu.

Pamungkas, B.A. (2020). *Perubahan penggunaan lahan dan kaitannya dengan urban heat island (studi kasus Kota Semarang, Jawa Tengah)* Institut Pertanian Bogor.

Sasky, Putri, Sobirin, & Wibowo, A. (2017). Pengaruh perubahan penggunaan tanah terhadap suhu permukaan daratan metropolitan Bandung Raya tahun 2000 – 2016. *Industrial Research Workshop and National Seminar*, 8(August), 26–27.

Sejati, Wahyu, A., Buchori, I., & Rudiarto, I. (2019). The spatio-temporal trends of urban growth and surface urban heat islands over two decades in the Semarang metropolitan region. *Sustainable Cities and Z Society*, 46(July 2018), 101432. doi: 10.1016/j.scs.2019.101432.

Sitorus, S.R.P. (2016). *Perencanaan penggunaan lahan*. Bogor: IPB Press.

Tursilowati, L. (2002). Urban heat island dan kontribusinya pada perubahan iklim dan hubungannya dengan perubahan lahan. *Pemanasan Global dan Perubahan Global - Fakta, Mitigasi, dan Adaptas*.

Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–84. doi: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8.

Wonorahardjo, S. (2012). New concepts in districts planning, based on heat island investigation. *Procedia - Social and Behavioral Sciences,* 36(June 2011), 235–42. doi: 10.1016/j.sbspro.2012.03.026.

Zhao, L. (2018). Urban growth and climate adaptatio. *Nature Climate Change,* 8(12), 1034. doi: 10.1038/s41558-018-0348-x.

KETERSEDIAAN EVAPOTRANSPIRASI MENGGUNAKAN *SURFACE ENERGI BALANCE ALGORITHM FOR LAND* DI TAMAN NASIONAL LORE LINDU PROVINSI SULAWESI TENGAH

EVAPOTRANSPIRATION AVAILABILTY USING SURFACE ENERGI BALANCE ALGORITHM FOR LAND IN LORE LINDU NASIONAL PARK CENTRAL SULAWESI PROVINCE

Abdillah Munawir[1*], Tania June[2], Cecep Kusmana[3], Yudi Setiawan[3]

[1]Program Magister Studi Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
[2]Program Studi Geofisika dan Meteorologi, Fakultas MIPA, IPB University
[3]Program Studi Pengelolaan SDA dan Lingkungan, Pascasarjana, IPB University

*abdillahmunawir@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Taman Nasional Lore Lindu (TNLL) merupakan kawasan konservasi sumberdaya alam dengan berbagai potensi keanekaragaman flora dan fauna endemik. Penelitian ini bertujuan mengestimasi nilai dan distribusi spasial dari faktor biofisik, fluks energi, dan evapotranspirasi. Aktivitas manusia dalam meningkatkan penggunaan lahan di sekitar kawasan TNLL telah mengakibatkan berkurangnya kawasan hutan sehingga mengancam keberadaan flora dan fauna endemik. Metode ini menggunakan model Surface Energi Balance Algorithm for Land (SEBAL) dan melakukan skenario pesimis, moderat, dan skenario optimis menggunakan model Sistem Dinamik. Data dianalisis menggunakan citra satelit landsat 7 (ETM + VIS /TIR)/landsat 8 (OLI/TIRS). Jumlah parameter yang diukur antara lain variabel biofisik albedo permukaan, NDVI, dan SAVI serta variabel fluks energi yakni emisivitas permukaan, suhu permukaan, radiasi netto, fluks bahang tanah, fluks bahang terasa, fluks bahang laten, sehingga dapat menghitung sebaran evapotranspirasi di wilayah penelitian. Hasil penelitian menunjukkan nilai rata-

rata evapotranspirasi dalam kawasan hutan lebih tinggi dibandingkan tanah terbuka atau penggunaan lahan lainnya. Nilai evapotranspirasi pada ketiga citra bervariasi antara 0,07 - 0,20 mm/jam. Evapotranspirasi bulan kering tahun 2002 lebih tinggi 17%-32% dibandingkan bulan kering tahun 2013 dan tahun 2018. Membangun model fluks energi dan evapotranspirasi, hasil model menjelaskan nilai fluks energi dan evapotranspirasi di TNLL dapat dikendalikan dengan upaya peningkatan reboisasi tutupan lahan hutan sebesar 10 %, pengendalian pertambahan penduduk sebesar 1 % per tahun, dan peningkatan kesadaran masyarakat sebesar 10 %. Keadaan ini menyimpulkan bahwa tidak terkendalinya perubahan fungsi lahan hutan dan pertumbuhan penduduk di TNLL berpengaruh dalam perubahan fluks energi dan penurunan evapotranspirasi di TNLL.

Kata Kunci: *evapotranspirasi, fluks energi, land-use change, lore lindu national park.*

ABSTRACT

Lore Lindu National Park or Taman Nasional Lore Lindu (TNLL) is a natural resource conservation area with various potentials for endemic flora and fauna diversity. This study aimed to estimate the value and spatial distribution of biophysical factors, energi flux, and evapotranspiration. Human activities in increasing land use around the TNLL area have resulted in the reduction of forest areas. It threatens the existence of endemic flora and fauna. This method used the Surface Energi Balance Algorithm for Land (SEBAL) model and performs the pessimistic, moderate, and optimistic scenarios using the System Dynamic model. The data were analyzed using landsat 7 satellite imagery (ETM + VIS / TIR) / landsat 8 (OLI / TIRS). The number of measured parameters includes biophysical variables surface albedo, NDVI, SAVI, energi flux variables (surface emissivity, surface temperature, net radiation, soil heat flux, felt heat flux, and latent heat flux). It can calculate the distribution of evapotranspiration in the research area. The results showed that the average value of evapotranspiration in forest areas was higher than open land or other land uses. The evapotranspiration values in the three images varied between 0.07 - 0.20 mm/hour. The dry month evapotranspiration in 2002 was 17%-32% higher than the dry months in 2013 and 2018. The build on the energi flux and evapotranspiration models results into the value of energi flux and evapotranspiration explanation in TNLL. The results can be controlled with efforts of increasing reforestation of forest land cover by 10%, controlling population growth by 1% per year, and

increasing public awareness by 10%. This situation concludes that uncontrolled changes in forest land function and population growth in TNLL have an effect on changes in energi flux and decreases in evapotranspiration in TNLL.

Keywords: *evapotranspiration, land-use change, energi flux, lore lindu national park*

PENDAHULUAN

*Surface Enerty Balance Algorith for Land (*SEBAL) pertama kali dirumuskan oleh Bastiaanssen, Menenti, Feddes, & Holtslag (1998) paper yang dipublikasikan tersebut menjelaskan tahapan formulasi SEBAL. Algoritma SEBAL mengestimasi variasi spasial dari parameter-parameter hidro-meteorologi yang utama secara empiris (Bastiaanssen, 2000; Sabajo et al., 2017), membutuhkan data citra satelit (Liang, 2000), suhu permukaan (Jiang, Fu, & Weng, 2015), dan tinggi tanaman (Wang, Li, & Xiao, 2021; Wang & Glenn, 2008), menghitung fluks dari setiap tutupan lahan (Anderson et al., 2019), dapat digunakan untuk mengolah citra *thermal infrared* pada resolusi meter hingga kilometer (Hunt, Daughtry, Eitel, & Long, 2004), serta hubungan empiris untuk setiap parameter disesuaikan untuk lokasi geografis dan waktu akuisisi citra (Li et al., 2015; Xiao et al., 2004-2005).

Taman Nasional Lore Lindu (TNLL) merupakan kawasan hutan dengan fungsi perlindungan flora dan fauna endemik, (Munawir, Juni, Kusmana, & Setiawan, 2019). Perubahan penggunaan lahan sangat tinggi dalam wilayah TNLL dari periode tahun 2002 sampai tahun 2013 menyebabkan hilangnya 2507 Ha hutan alam yang berubah fungsi menjadi lahan tanaman perkebunan, budidaya pertanian dan permukiman. Oleh karena itu, penting mengetahui estimasi evapotranspirasi yang merupakan proses kehilangan air suatu penutupan lahan melalui evaporasi dari permukaan tanah dan transpirasi dari permukaan tanaman (June, Meijide, Stiegler, Kusuma, & Knohl, 2018; Allen et al., 2007). Keuntungan utama dari penerapan *remote sensing* untuk analisis evapotranspirasi ialah estimasi evapotranspirasi dapat diturunkan secara langsung tanpa menghitung proses hidrologi yang kompleks (Li et al., 2015; Beg, Al-Suttani, Ochtyra, Jarocinska, & Marcinkowska, 2016). Adapun alat spasial seperti GIS memungkinkan untuk pengelolaan dalam skala besar informasi spasial yang saling terkait dan kemampuan untuk mengintegrasikan dan menganalisis informasi dari layer-layer (Zhang, Kimball, & Running, 2016; Netzband & Stefanov, 2010; Lian & Huang, 2016). Dari pengkajian secara klimatologis untuk wilayah kawasan hutan dan penggunaan lahan lain menurut (Wang & Dickinson, 2012), evapotranspirasi sangat menentukan

kecenderungan ketersediaan air tanaman pada kawasan hutan dan penggunaan lahan lainnya. Di lain pihak evapotranspirasi dihitung dengan mengukur beberapa parameter permukaan yang meliputi albedo permukaan, suhu permukaan, emisivitas permukaan, fluks bahang tanah, kekasapan permukaan, radiasi netto, gradien suhu udara (dT), fluks bahang terasa, dan fluks bahang laten (Gan & Gao., 2015; Li et al., 2017).

Dengan demikian menjadi sangat penting untuk mengkaji estimasi fluks energi dan evapotranspirasi pada berbagai faktor di TNLL menggunakan model SEBAL dan sistem dinamik. Di lain pihak penelitian ini sangat sesuai dengan tema buku Seminar FST 2022 "*Accelerating Sustainable Innovation Towards Society 5.0* ", dengan sub topik "*Environment and Sustainable Development*" khususnya topik *Biodiversity* dan *Environmental Studies*. Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi estimasi fluks energi dan evapotranspirasi yang berpengaruh terhadap laju deplesi tutupan lahan hutan dan membangun model ketersediaan evapotranspirasi beberapa tahun ke depan; untuk upaya pengendalian deplesi tutupan lahan hutan, sehingga fungsi kawasan hutan TNLL dapat terjaga dengan baik dan tetap menjaga keanekaragaman hayati (Biodiversitas) di TNLL.

PEMBAHASAN

1. Energi *Flux* TNLL

Kawasan TNLL seluas 229.000 ha berdasarkan surat instruksi kedua oleh Menteri Kehutanan No. 593/Kpts-II/1993 tanggal 5 Oktober 1993. Kemudian tahun 1999 dilakukan pengukuran dan tata batas definitif melalui Surat Keputusan Menteri Kehutanan dan Perkebunan No. 464/kpts-II/1999 tanggal 28 Juli 1999, secara resmi luas Taman Nasional Lore Lindu ditetapkan sebesar 217.991,18 Ha. Pada hasil perhitungan fluks energi sebanyak dua lima parameter di kawasan hutan TNLL di Provinsi Sulawesi Tengah menunjukkan penurunan fluks energi dan evapotranspirasi (Tabel 1) dengan nilai rata-rata dari hasil perhitungan citra landsat 7 dan landsat 8 tahun 2002, 2013, dan 2018.

Tabel 1. Nilai Parameter Perhitungan Fluks Energi
Tahun 2002, 2013, 2018

Year	NDVI	SAVI	LAI	Ts	Rn	G	H	LE	ET	NDVI/ Albedo
2002	0,8	0,62	2,4	29,21	231,52	9,67	69,52	198,68	0,2	6,11
2013	0,723	0,59	2,12	30,57	197,21	10,40	84,42	83,16	0,17	5,85
2018	0,7	0,55	1,65	31,75	164,5	10,75	91,67	58,35	0,13	5,17
Minimum	0,7	0,55	1,65	29,21	164,5	9,67	69,52	58,35	0,13	5,85
Maximum	0,8	0,62	2,4	31,75	231,52	10,75	91,67	198,68	0,2	6,11
Mean	0,74	0,59	2,06	30,51	197,74	10,27	81,87	113,4	0,17	5,71
Standar Deviation	0,02	0,04	0,52	1,63	48,53	0,63	4,71	45,25	0,07	0,65

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 1 dari data Citra Landsat 7 ETM+ tanggal akuisisi 28 September 2002 dan citra landsat 8 tanggal akuisisi 20 Oktober 2013 serta 16 November 2018, menunjukkan bahwa pendugaan NDVI pada wilayah TNLL menggunakan citra landsat memakai band NIR dan band merah seperti pendugaan NDVI pada vegetasi lainnya (Sabajo et al., 2017; Juni, Meijide, Stiegler, Kusuma, & Knohl, 2018). Hasil NDVI menunjukkan ada kaitan NDVI dan SAVI dimana semakin besar jumlah vegetasi semakin menunjukkan tajuk tanaman yang semakin rapat. Nilai NDVI pada wilayah TNLL pada tahun 2002, 2013, dan 2018 berturut-turut adalah -0,11 ± 0,80, -0,32 ± 0,723, -0,17 ± 0,7 diikuti dengan nilai SAVI -0,05 ± 0,62, 0,39 ± 0,59, -0,09 ± 0,55 sehingga dapat mengindikasikan bahwa NDVI dan SAVI akan meningkat dengan meningkatnya jumlah kerapatan vegetasi tanaman, sebaliknya dengan menurunnya jumlah vegetasi mengakibatkan penurunan nilai NDVI dan SAVI.

Nilai albedo diperoleh dari pengolahan data citra landsat 7 ETM+ tahun 2002 serta landsat 8 tahun 2013 dan tahun 2018. Tabel 1 menunjukkan deskripsi albedo tahun 2002, 2013 dan 2018 pada kawasan TNLL dimana pada tahun 2002 albedo di TNLL berkisar 0,01-0,12 sedangkan pada tahun 2013 nilai albedo memiliki nilai sekitar 0,03-0,16. Terjadi perubahan nilai albedo pada tahun 2018 dengan peningkatan berkisar antara 0,04-0,17.

Hal ini menunjukkan bahwa nilai albedo terendah di wilayah TNLL berada pada tahun 2002. Albedo permukaan sangat dipengaruhi oleh kerapatan vegetasi. Wilayah dengan kerapatan vegetasi tinggi memiliki nilai albedo yang rendah (Bastiaanssen, 2000; Beg, Al-Suttani, Ochtyra, Jarocinska, & Marcinkowska, 2016). Estimasi suhu permukaan diekstraksi dari band 6 pada landsat 7 dan band 10 pada landsat 8 yang merupakan band thermal pada citra landsat. Band 6 dan band 10 merekam emisi permukaan pada panjang gelombang 10,4-12,5 µm (landsat 7) dan panjang gelombang 10,30–12,50 (landsat 8). Pendugaan suhu permukaan didapatkan dari koreksi emisivitas (persamaan 5) dimana nilai emisivitas untuk lahan vegetasi diasumsikan sekitar 0,95 (Norman, Kustas, & Humes, 1995; Gan & Gao, 2015). Rata-rata suhu permukaan kawasan TNLL pada September tahun 2002 sebesar 11,16 °C ± 29,21°C, Oktober 2013 sebesar 7,9°C ± 30,57°C, dan September 2018 sebesar 9,5°C ± 31,75°C . Berdasarkan hasil tersebut terlihat bahwa suhu permukaan pada kawasan TNLL menunjukkan fluktuasi kenaikan suhu permukaan dalam kurun waktu 2002, 2013, dan 2018. Kondisi ini menjelaskan bahwa telah terjadi perubahan penutupan lahan pada kawasan TNLL selama beberapa tahun utamanya kawasan hutan sebagaimana dijelaskan dalam Erasmi, Twele, Ardiansyah, Malik, & Kappas, (2004) dan Munawir, June, Kusmana, & Setiawan (2019) bahwa terjadi penurunan perubahan luasan kawasan hutan TNLL dari tahun ke tahun.

Suhu permukaan pada bulan September tahun 2002 lebih rendah 1,36 °C dibandingkan pada bulan Oktober 2013. Hal ini diakibatkan oleh peningkatan nilai suhu permukaan banyak bergantung pada intensitas radiasi yang masuk (Sabajo et al., 2017; Artikanur & June, 2019). Radiasi gelombang pendek yang masuk lebih besar nilainya dibandingkan radiasi gelombang panjang yang masuk, sehingga untuk melihat hasil suhu permukaan pada beberapa bulan dalam beberapa tahun tersebut dapat dilihat dari nilai radiasi gelombang pendek yang masuk (Juni, Meijide, Stiegler, Kusuma, & Knohl, 2018; Lillesand & Kiefer, 2004).

2. *Net Radiation* (Rn), *Soil Heat* (G), *Sensible Heat* (H), dan *Latent Heat* (LE)

Hasil ekstraksi radiasi netto pada tahun 2002 pada kawasan TNLL yang masih didominasi vegetasi hutan memiliki nilai kisaran 52,11 ± 231,52 Wm-2, yang berarti lebih rendah jika dibandingkan dengan tahun 2013 dan 2018 yang memiliki radiasi netto sekitar 57,28 ± 197,21 Wm-2 dan 79,73 ± 164,50 Wm-2. Nilai radiasi netto di bulan September 2002 lebih besar dibandingkan bulan Oktober 2013 dan radiasi netto di bulan Oktober 2018 juga lebih rendah dibandingkan bulan September 2018 akan tetapi lebih tinggi dari nilai radiasi netto dari tahun 2013. Hal ini dapat terjadi karena nilai radiasi netto sangat dipengaruhi radiasi gelombang pendek yang keluar. Semakin tinggi nilai radiasi gelombang pendek yang keluar maka nilai radiasi netto akan semakin kecil (Zhang, Kimball, & Running, 2018; Juni, Meijide, Stiegler, Kusuma, & Knohl, 2018). Hasil dari nilai radiasi netto akan dipartisi kedalam komponen energi permukaan seperti fluks bahang tanah (G), fluks bahang terasa (H), dan fluks bahang laten (LE). Nilai dari radiasi netto memiliki arti penting karena terkait dengan jumlah energi yang tersedia untuk dipergunakan pada proses fisik dan biologi dalam sistem biosfer (Bastiaanssen, Menenti, Feddes, & Holtslag, 1998; Sabajo et al., 2017).

Soil heat fuks (G) dihitung dari proporsi radiasi netto yang diterima oleh suatu permukaan untuk memanaskan tanah (Li et al., 2015, 2017, June, Meijide, Stiegler, Kusuma, & Knohl, 2018). Hasil ekstraksi nilai fluks pemanasan tanah (G) menunjukkan pada tahun 2002 untuk kawasan hutan TNLL mempunyai kisaran nilai fluks pemanasan tanah sekitar 3,75 ± 9,67 Wm-2 dan terjadi perubahan yang cukup signifikan di tahun 2013 dan 2018 menjadi 4,41 ± 10,40 Wm-2 dan 4,83 ± 10,75 Wm-2. Secara rata-rata nilai fluks bahang tanah di bulan September tahun 2018 lebih tinggi ±1 Wm-2 dibandingkan bulan Oktober tahun 2013 dan bulan September 2002. Peningkatan nilai fluks bahang tanah di bulan September tahun 2018 disebabkan oleh suhu permukaan yang juga bernilai lebih tinggi dibandingkan bulan Oktober 2013 dan bulan September tahun 2002. Suhu permukaan berkontribusi dalam perhitungan fluks bahang tanah dan juga digunakan untuk memanaskan tanah (Li et al., 2015; Sabajo et al., 2017).

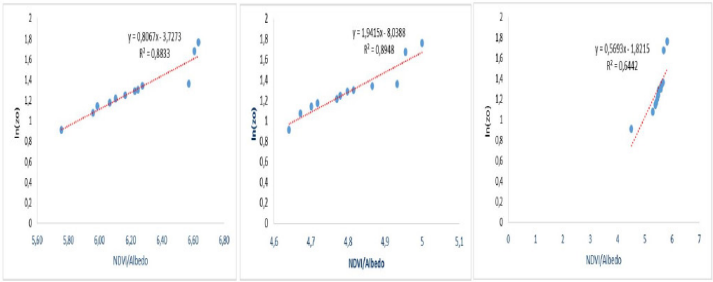
Fluks bahang terasa (H) adalah energi yang digunakan untuk memanaskan udara (Beg, Al-Suttani, Ochtyra, Jarocinska, & Marcinkowska, 2016; Hunt, Daughtry, Eitel, & Long, 2004). Fluks bahang terasa akan semakin tinggi ketika semakin tidak ada vegetasi (Liang et al., 2000; Allen et al., 2007; Sun, 2016). *Surface Energi Balance Algorithm for Land* (SEBAL) dapat mengestimasi fluks bahang terasa (Bastiaanssen et al. 1998) dengan menghitung panjang kasap (z0), kecepatan angin (Allen, Tasumi, Trezza, Waters, Bastiaanssen, 2002) pada level 200 meter (u200), kecepatan kasap (u*), tahanan aerodinamik (rah), dan perbedaan suhu antara dua ketinggian (dT) pada setiap piksel (Mu et al., 2011; Miralles et al., 2011). Koefisien korelasi yang dihasilkan dari hubungan antara dT dengan suhu permukaan (Ts) digunakan untuk menghitung nilai fluks bahang terasa (H) pada setiap piksel (Long & Sing, 2012; Hunt et al. 2011), dengan mempertimbangkan pula massa jenis udara (ρ), panas spesifik udara (Cp) dan tahanan aerodinamik yang telah dihitung sebelumnya (Bastiaanssen, 2002; Kalma, McVicar, & McCabe, 2008). Hubungan linier antara NDVI/albedo dengan ln_Z0 (Gambar 1) menghasilkan persamaan yang baik dengan koefisien korelasi positif rata-rata sebesar 0.89 (R2 = 0.8). Hal ini menunjukkan bahwa NDVI/albedo yang dihasilkan dari perhitungan citra satelit dapat menduga nilai ln_Z0 setiap piksel. Keseluruhan nilai panjang kasap (Zo) secara rata-rata dari tahun 2002 sebesar 3,83 m, terjadi perubahan Zo pada tahun 2013 dengan nilai berkisar 6,11 m, sedangkan pada tahun 2018 nilai Zo berkisar 6,45.

Semakin tinggi tanaman, panjang kasap akan cenderung meningkat (Miralles et al., 2011; June, Meijide, Stiegler, Kusuma, & Knohl, 2018). Hal ini menggambarkan bahwa wilayah dengan vegetasi yang rapat dan tinggi, permukaannya lebih kasap dibandingkan dengan wilayah yang vegetasinya rendah. Hasil analisis fluks bahang terasa terlihat bahwa tahun 2013 dan 2018 terdapat luasan areal lahan terbuka yang cukup luas mengakibatkan peningkatan nilai fluks bahang terasa lebih tinggi dibandingkan dengan kawasan hutan bervegetasi. Sebaran spasial dari fluks bahang terasa pada bulan September 2002 nilai estimasi berkisar antara 47,86 - 69,52 Wm-2, pada bulan November 2013 nilai fluks bahang terasa berkisar nilai 35,151 - 84,42 Wm-2. Secara umum, nilai rata-rata fluks bahang terasa

pada bulan kering tahun 2002 lebih besar 6% dibandingkan bulan kering tahun 2013. Nilai ini akan berpengaruh pada nilai fluks bahang laten yang dihasilkan. Dilihat dari sebaran spasialnya, fluks bahang terasa pada semua citra lebih tinggi nilainya pada tanah terbuka (termasuk jalan) dibandingkan pada tutupan lahan hutan (Artikanur & June, 2019). Selain itu, nilai fluks bahang terasa yang bernilai positif pada semua citra juga berarti suhu permukaan baik pada kanopi ataupun tanah (untuk tutupan lahan gundul) nilainya lebih tinggi dibandingkan suhu udara (Anderson et al., 2019).

Fluks pemanasan laten (λE) merupakan bentuk energi yang digunakan untuk menguapkan sejumlah air dari permukaan tanah ke atmosfer. Hasil ekstraksi dari data citra landsat ETM+ pada tahun 2002, nilai λE terbesar terdapat pada tahun 2002 dengan kisaran 41,09 - 198,68 Wm-2. Perbedaan terjadi pada tahun 2013 dan 2018, dimana nilai panas laten pada tahun 2013 terjadi penurunan dengan nilai 45,12 - 83,16 Wm-2. Hasil ini tidak jauh berbeda dengan nilai fluks panas laten pada tahun 2018 dengan nilai 46,24 - 58,35 Wm-2. Hasil tersebut menunjukkan besaran perubahan lahan kawasan hutan menjadi areal penggunaan lain. Sebagaimana dijelaskan dalam Munawir, Juni, Kusmana, & Setiawan (2019) hal ini sangat mempengaruhi penurunan fungsi kawasan taman nasional, dan berpengaruh terhadap jumlah pemanasan laten (Sabajo et al., 2017). Hal ini memiliki dampak yang sangat signifikan dimana dengan berkurangnya jumlah kawasan hutan nilai fluks panas laten (λE) semakin rendah. Hasil ini sejalan dengan June, Meijide, Stiegler, Kusuma, & Knohl (2018) yang menyatakan bahwa kerapatan tanaman menginvestasikan lebih banyak energi untuk fluks bahang laten sehingga memiliki suhu permukaan yang sangat rendah. Sedangkan pada tahun 2013 dan 2018 berkurangnya kawasan hutan TNLL mengakibatkan media untuk penguapan seperti air sebagai sumber evaporasi dan pepohonan sebagai sumber transpirasi sedikit jumlahnya, sehingga energi yang diterima permukaan lebih banyak digunakan untuk pemanasan udara dan tanah. Fluks bahang laten merupakan partisi dari Rn seperti halnya fluks bahang terasa (H) dan fluks bahang tanah (G) (Sanchez, Kustas, Caselles, & Anderson, 2008; Artikanur & June, 2019). Fluks bahang laten dapat menunjukkan jumlah radiasi netto (Rn) yang digunakan untuk penguapan yaitu

evapotranspirasi. Sesuaian pendapat Allen et al. (1998) yang menyatakan bahwa faktor-faktor yang mempengaruhi fluks bahang laten yaitu aspek pengelolaan lingkungan, utamanya kawasan tutupan lahan hutan.



Gambar 1. Hubungan Ln (Zo)-NDVI/Albedo 2002, 2013, 2018

3. *Estimasi Evapotranspirasi* (ET) *Surface Energi Balance Algorithm for Land* (SEBAL)

Perhitungan evapotranspirasi penting dilakukan karena dapat menentukan besarnya penggunaan air konsumtif untuk tanaman, analisis ketersediaan air, dan kapasitas pompa untuk irigasi (Amarakoon, Chen, & McLean, 2017). Menurut Allen, Pereira, Raes, & Smith (1998), faktor-faktor yang mempengaruhi evapotranspirasi yaitu parameter cuaca, faktor tanaman, dan aspek manajemen dan lingkungan. Sebaran spasial dari evapotranspirasi menunjukkan pada bulan September 2002 dengan nilai berkisar antara 0,1701-0,2254 mm/jam, bulan November 2013 nilai evapotranspirasi cenderung menurun dengan rentang nilai 0,1602-0,2215 mm/jam. Pada bulan September 2018 nilai evapotranspirasi berkisar dengan nilai 0,12607-0,2256 mm/jam. Secara umum, nilai rata-rata evapotranspirasi berdasarkan nilai rasio LE/RN pada bulan kering tahun 2002 lebih besar 86% dibandingkan bulan kering tahun 2013 sebesar 42% dan menurun pada tahun 2018 sebesar 35% (Tabel 2).

Tabel 2. Persentase Jumlah Radiasi Netto untuk Proses Fluks Uap Air

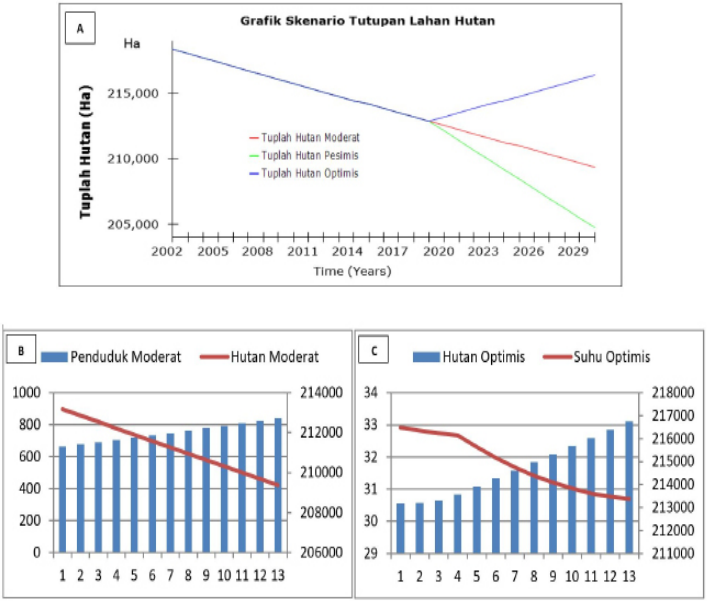
Tahun	LE (WM^2)	RN (WM^2)	Rasio LE/RN (%)
2002	198.68	231.52	86
2013	83.16	197.21	42
2018	58.35	164.5	35

Fluks bahang laten merepresentasikan bagian evapotranspirasi yang diturunkan dari neraca energi yang akan selalu menuju kesetimbangan bersama dengan fluks energi yang lainnya (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998; Xiao et al., 2014). Evaporasi dari suatu permukaan dapat ditentukan dengan baik apabila semua komponen yang mempengaruhi neraca energi di permukaan, baik itu radiasi netto (Rn), fluks bahang terasa (H) dan fluks bahang tanah (G) diketahui nilainya (Achard, Eva, Mayaux, Stibig, Belward, 2014; June, Meijide, Stiegler, Kusuma, & Knohl, 2018). Untuk wilayah TNLL, Munawir, June, Kusmana, & Setiawan (2022) menemukan bahwa wilayah kawasan hutan yang mengalami perubahan lahan menyebabkan penurunan evapotranspirasi bulanan berkisar 2%. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan lahan kawasan hutan mengakibatkan penurunan evapotranspirasi setiap tahunnya di kawasan TNLL.

4. Model *Forecast* Estimasi Fluks Energi dan Evapotranspirasi di TNLL

Pada kawasan TNLL menurut data kependudukan dari 15 desa menunjukkan bahwa jumlah penduduk pada tahun 2002 adalah 137 jiwa (BPS, 2002) dan meningkat signifikan pada tahun 2018 menjadi 683 jiwa (BPS, 2018) dengan laju pertumbuhan penduduk per tahun mencapai 2,7%. Hasil simulasi model eksisting diperoleh bahwa peningkatan penduduk berdampak pada penurunan kawasan hutan (Margono et al., 2012; Erasmi et al., 2004; Mu, Zhao, Running, 2011). Di sisi lain pertambahan penduduk diikuti dengan peningkatan lahan terbangun, pertanian dan perkebunan yang pada tahun 2013 telah mengurangi luasan kawasan hutan TNLL (Munawir, June, Kusuma, & Setiwan, 2019).

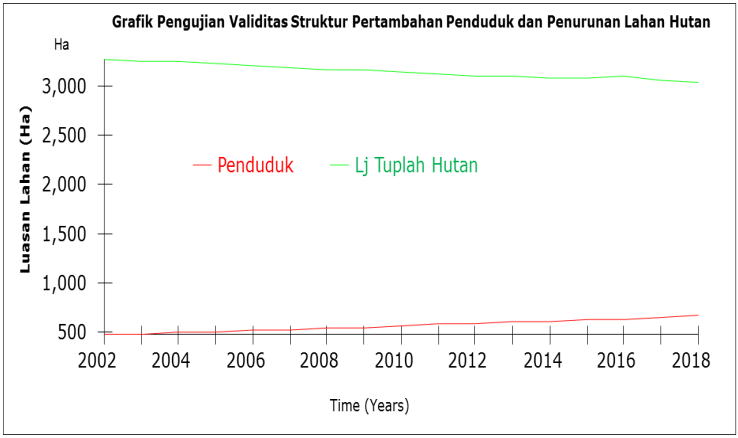
Model skenario optimis adalah skenario yang menggambarkan terjadinya pertambahan tutupan lahan hutan dari hasil kebijakan reboisasi kawasan hutan 10%, peningkatan kesadaran masyarakat 10% dan program BKKBN sebesar 1% per tahun. Model ini menunjukkan terjadinya penurunan suhu menjadi 30,70°C, mengakibatkan terjadinya perubahan fluks bahang laten menjadi 51,00 Wm-2 dan evapotranspirasi menjadi 0,12 mm/jam.



Gambar 2. Skenario Tutupan Lahan Hutan (A) dan Skenario Penduduk (B), Hutan dan Suhu (C)

Validasi Model

Validasi model dilakukan atas validasi struktur dan validasi kinerja. Pengujian validitas struktur adalah bertujuan untuk mengetahui dan memperoleh keyakinan sejauh mana keserupaan struktur model mendekati struktur nyatanya. Pengujian validitas dilakukan terhadap *main models* yaitu submodel tutupan lahan hutan. Berikut adalah grafik uji validitas struktur model.



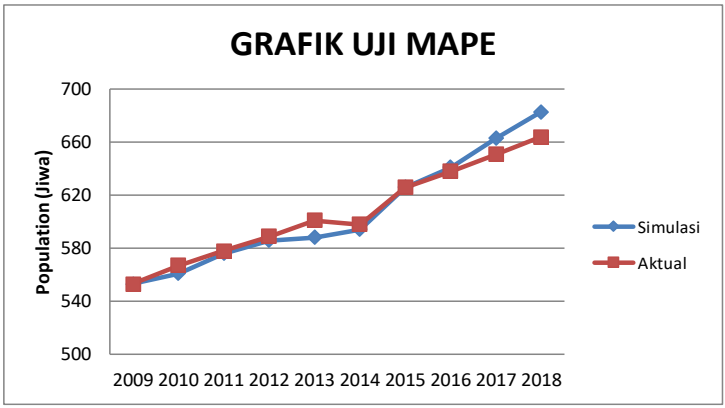
Gambar 3. Grafik Pengujian Validitas Struktur Model (Pertambahan Penduduk Diikuti dengan Penurunan Laju Tutupan Lahan Hutan)

Uji validitas kinerja dilakukan untuk mengetahui bahwa model yang dikembangkan dapat diterima secara akademik atau tidak. Uji ini juga sekaligus untuk menghindari struktur model yang salah (*model of seldom*). Caranya adalah dengan melakukan validasi output model, yaitu dengan membandingkan output model dengan data empirik (Eriyatno, 2012).

Tabel 3. Validasi Kinerja Sub Model Penduduk

Tahun	Penduduk Aktual	Penduduk Simulasi
2009	553	555
2010	561	567
2011	576	578
2012	586	589
2013	588	601
2014	594	613
2015	626	626

Tahun	Penduduk Aktual	Penduduk Simulasi
2016	641	638
2017	663	651
2018	683	664
	R	0,989579949
	MSE	1,81016E-04
	RMSPE	0,013454233
	U^M	0,004812834
	U^S	0,187637122
	U^C	0,807550044



Gambar 4. Grafik Simulasi Skenario Penduduk

Hasil uji validasi *Theil Statistics* (Tabel 3) menunjukkan bahwa nilai R sebesar 0,99 atau mendekati 1 yang menyatakan bahwa data yang ada sangat diterima oleh model. Nilai bias komponen UM = 0, variasi komponen US = a dan kovariasi komponen UC = 1- a, berpotensi tidak terjadi sistematik error. Dengan pengujian *Theil Statistic* ini, error yang dapat ditoleransi sangat bergantung tujuan model dan karakteristik dari data. Mengingat, model *system dynamics* untuk *behavior prediction* bukan *point prediction* maka kondisi tersebut cukup memadai.

Adapun hasil uji MAPE (Gambar 4) menunjukkan hasil yang sangat baik antara nilai data aktual dan data simulasi, dimana semakin rapat antara kedua nilai simulasi maka modelnya semakin baik dan dapat diterima.

KESIMPULAN

1. Meningkatnya fluktuasi suhu di Taman Nasional Lore Lindu (TNLL) mengindikasikan terjadinya penurunan luasan lahan hutan dan berdampak langsung pada perubahan fluks energi sehingga mengancam keberadaan flora dan fauna endemik (*biodiversity*) di TNLL.
2. Nilai evapotranspirasi memiliki pola yang sama dengan fluks bahang laten. Fluks bahang laten adalah partisi dari neraca energi dengan rasio LE/Rn periode kering, nilai ini digunakan untuk menduga kebutuhan air kawasan TNLL dimana diketahui bahwa berdasarkan model SEBAL nilai evapotranspirasi di TNLL cenderung semakin menurun dari tahun ke tahun.

DAFTAR PUSTAKA

Achard F., Eva H.D., Mayaux P., Stibig H.J., & Belward A. (2004). Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. Global Biogeochem. Cycles 18, 1–11.doi:10.1029/2003 GB002142.

Artikanur, S. D., & June, T. (2019). Surface Temperature and Heat Fluxes: Comparison between Natural Forest and Oil Palm Plantation in Jambi Province Using Surface Energi Balance Algorithm for Land (SEBAL). Agromet, 33(2), 62-70. https://doi.org/10.29244/j.agromet.33.2.62-70.

Amarakoon, D., Chen, A., McLean, P., (2000). Estimating daytime latent heat flux and evapotranspiration in Jamaica. Agricultural and Forest Meteorology 102, 113–124. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00105-2

Anderson, J.E., Douglas, T.A., Barbato, R.A., Saari, S., Edwards, J.D., Jones. R.M. (2019). Linking vegetation cover and seasonal thaw depths in interior Alaska permafrost terrains using remote sensing. *Journal Remote Sensing of Enviroment,* 233, 111363. Elsevier Procedia.

Allen, R.G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J.L., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I. & Robinson, C.W. (2007) Satellite-Based Energi Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)- Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133, 395-406. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(395).

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56.

Allen R.G., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., & Bastiaanssen W.G.M. (2002). Surface Energi Balance Algorithms for Land. Idaho(US) : Idaho Implementation.

BPS [Badan Pusat Statistik]. 2002. Penjelasan Teknis Data Podes 2002. Palu, Sulawesi Tengah.

BPS [Badan Pusat Statistik]. 2018. Penjelasan Teknis Data Podes 2002. Palu, Sulawesi Tengah.

Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M. (1998). A remote sensing surface energi balance algorithm for land (SEBAL) 1 formulation. *Journal of Hydrology*, 212; 198-212.

Bastiaanssen, W.G.M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229, 87-100.

Beg A.A.F., Al-Suttani, A.H., Ochtyra, A., Jarocinska A., & Marcinkowska A. 2016. Estimation of evapotranspiration using SEBAL algorithm and Landsat-8 dataa case study: Tatra Mountains Region. *Journal of Geological Resource and Engineering*, 6, 257-270.

Erasmi S, André Twele, Muhammad Ardiansyah, Adam Malik and Martin Kappas. (2004). Mapping deforestation and land cover conversion At the rainforest margin in central sulawesi, indonesia. EARSeL eProceedings 3, 3/2004.

Eriyatno. (2012). Ilmu Sistem, Meningkatkan Mutu dan Efektivitas Manajemen. Surabaya (ID): Penerbit Guna Widya.

Hunt, E.R., Daughtry, C.S.T., Eitel, J.U.H., Long, D.S., (2011). Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index. Agronomy Journal 103, 1090–1099.

Gan, G. & Gao, Y. (2015). Estimating time series of land surface energy fluxes using optimized two source energy balance schemes: Model formulation, calibration, and validation. Agric. For. Meteorol. 2015, 208, 62–75.

June. T., Meijide, A., Stiegler, C., Kusuma, A.P., & Knohl A. (2018). The influence of surface roughness and turbulence on heat fluxes from an oil palm plantation in Jambi, Indonesia. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 149 : 1-11.

Jiang, Y., Fu, P. & Weng, Q. (2015). Assessing the Impacts of Urbanization-Associated Land Use/Cover Change on Land Surface Temperature and Surface Moisture: A Case Study in the Midwestern United States, Remote Sens., 7, 4880-4898, https://doi.org/10.3390/rs70404880.

Kalma, J.D.; McVicar, T.R.; McCabe, M.F. (2008). Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surv. Geophys*, 29, 421–469.

Liang, S. (2000). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms, Remote Sens. *Environ.*, 76, 213-238, https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00205-4.

Lian, J.; Huang, M. (2016). Comparison of three remote sensing based models to estimate evapotranspiration in an oasis-desert region. *Agric. Water Manag*, 165, 153–162

Lillesand, T.M., Kiefer R.W., & Chipman J.W. (2004). Remote Sensing and Image Interpretation. Fifth Edition. Denver (US): John Wiley & Sons, Inc.

Li, Y., Zhao, M., Motesharrei, S., Mu, Q., Kalnay, E., & Li, S. 2015. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations, Nat. Commun., 6, 6603, https://doi.org/10.1038/ncomms7603, 2015.

Li, Y., Huang, C., Hou, J., Gu, J., Zhu, G., & Li, X. (2017). Mapping daily evapotranspiration based on spatiotemporal fusion of ASTER and MODIS images over irrigated agricultural areas in the Heihe River Basin, Northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 244, 82–97.

Long, D., & Singh, V.P. (2012). A modified surface energy balance algorithm for land (M-SEBAL) based on a trapezoidal framework. Water Resour. Res. 2012, 48, W02528

Munawir, A., June, T., Kusmana. C., & Setiawan Y. (2019). Dynamics Factors that Affect the land Use Change in the Lore Lindu National Park. Proceeding of SPIE 11372. Event: Sixth Internasional Symposium on LAPAN-IPB Satelite. Bogor (ID).

Munawir, A., June, T., Kusmana, C., & Setiawan, Y. (2022). SEBAL Model to Estimate Biophysics and Energy Flux Variable : Availability of Evapotranspiration Distribution Using Remote Sensing in Lore Lindu National Park. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 950 012022. doi:10.1088/1755-1315/950/1/012022

Margono, B. A., Turubanova, S., Zhuravleva, I., Potapov, P., Tyukavina, A., Baccini, A., Goetz, S., & Hansen, M.C. (2012). Mapping and monitoring deforestation and forest degradation in Sumatra (Indonesia) using Landsat time series data sets from 1990 to 2010, Environ. Res. Lett., 7, 34010, https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/034010.

Netzband, M., Stefanov, W.L., (2010). Urban Land Cover And Spatial Variation Observation Using Aster And Modis

Satellite Image Data .Center for Environmental Studies, Arizona State University, Tempe, AZ 85287-3211 USA; maik.netzband@asu.edu.

Miralles, D.G.; Holmes, T.R.H.; De Jeu, R.A.M.; Gash, J.H.; Meesters, A.G.C.A.; Dolman, A.J. (2011). Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 15, 453–469.

Mu, Q., Zhao, M., Running S.W. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens. Environ*, 115, 1781–1800.

Norman, J.M., Kustas, W.P., & Humes, K.S. (1995). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agric. For. Meteorol*, 77, 263–293.

Sabajo, C.R., Maire G.L., June T., Meijide. A., Roupsard O., & Knohl A. (2017). Expansion of oil palm and other cash crops causes an increase of the land surface temperature in the Jambi province in Indonesia. *Biogeosciences*, 14, 4619 4635.

Sánchez, J.M.; Kustas, W.P.; Caselles, V., & Anderson, M.C. (2008) Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sens. Environ*, 112, 1130–1143.

Sun, H. (2016). A two-source model for estimating evaporative fraction (TMEF) coupling Priestley-Taylor formula and two-stage trapezoid. *Remote Sens*, 2016, 8, 248.

Wang C., & Glenn N.F. (2008). A linear regression method for tree canopy height estimation using aiborne lidar data. *Can. J. Remote Sensing*, 34 (2): 217-227.

Wang, H.; Li, X.; Xiao, J.; & Ma, M. (2021). Evapotranspiration components and water use efficiency from desert to alpine ecosystems in drylands. *Agric. For. Meteorol*, 2021, 298–299, 108283.

Wang, K.; Dickinson, R.E. (2012). A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Rev. Geophys*. 50, 1–54.

Xiao, X., Boles, S., Frolking, S., Li, C., Babu, J.Y., Salas, W., & Moore B. (2004). Mapping Paddy Rice Agriculture in Southern China Using Multi-Temporal MODIS Image. *J Remote Sens of Environtment*, 100, 95-113.

Zhang, K.; Kimball, J.S.; & Running, S.W. (2016). A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. WIREs Water, 3, 834–853.

Gan, G., & Gao, Y. (2015). Estimating time series of land surface energy fluxes using optimized two source energy balance schemes: Model formulation, calibration, and validation. *Agric. For. Meteorol*, 208, 62–75.

PENGENDALIAN DEFORESTASI DI KABUPATEN BANJARNEGARA, PROVINSI JAWA TENGAH, INDONESIA: IMPLIKASINYA UNTUK MEMBANGUN EKONOMI HIJAU

CONTROLLING DEFORESTATION IN BANJARNEGARA DISTRICT, CENTRAL JAVA PROVINCE, INDONESIA: IMPLICATION FOR FOSTERING GREEN ECONOMY

Guntur Bagus Pamungkas[1*], Anindya Putri Tamara[2], Galih Hendro Wijayanto[1]

[1]Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Jurusan Teknik, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
[2]Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik, Universitas Semarang

*gunturbagusp@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Indonesia selalu menjadi sorotan dunia karena mengalami fenomena deforestasinya yang terus meningkat secara signifikan. Salah satu daerah yang sering mengalami deforestasi adalah Kabupaten Banjarnegara, terutama di daerah pegunungan yang berada pada kisaran 1000 sampai 3000 meter di atas permukaan laut, dan sisa-sisa kawasan hutan darat masih dapat dengan mudah ditemukan. Setiap tahun bahaya bencana seperti erosi dan tanah longsor selalu mengancam Kabupaten Banjarnegara. Penelitian ini memiliki tujuan mengidentifikasi gambaran fenomena deforestasi, serta menganalisis kawasan-kawasan yang mengalami deforestasi di Kabupaten Banjarnegara. Tujuan lain dari penelitian ini yaitu untuk menentukan strategi penanganan yang mengedepankan konsep ekonomi hijau untuk mengatasi permasalahan deforestasi di Kabupaten Banjarnegara. Analisis yang diusung pada penelitian ini adalah analisis Land Use and Land Cover Changes (LULCC) untuk mengetahui perubahan tutupan lahan serta analisis Location Quotient (LQ) dan Shift Share guna

mengamati potensi perekonomian yang ada di Kabupaten Banjarnegara. Hasil menunjukkan bahwa terjadi deforestasi yang cukup tinggi di Kabupaten Banjarnegara. Hal tersebut dapat terlihat dari adanya penurunan luasan vegetasi yaitu dari 85870,776 ha menjadi 78.545,131 ha. Tiga titik kawasan yang mengalami fenomena deforestasi terjadi di Kecamatan Batur, Kalibening, Wanadadi dan Bawang. Skema yang perlu dilakukan adalah menerapkan konsep ekonomi hijau pada kawasan-kawasan tersebut untuk mengembangkan potensi sumber daya alam diantaranya berupa pengembangan pertanian, perikanan, dan hutan dengan tetap memperhatikan ekologi lingkungan.

***Kata Kunci*:** *deforestasi, green economy, pembangunan.*

ABSTRACT

Indonesia has always been in the spotlight of the world because of its deforestation phenomenon which continues to increase significantly. One area that often experiences deforestation is Banjarnegara Regency, especially in mountainous areas which are in the range of 1000 to 3000 meters above sea level, and remnants of land forest areas can still be easily found. Every year the danger of disasters such as erosion and landslides always threatens Banjarnegara Regency. This study aims to identify a description of the phenomenon of deforestation, as well as to analyze the areas experiencing deforestation in Banjarnegara Regency. Another objective of this study is to determine a strategy for dealing with the concept of a green economy to address the problem of deforestation in Banjarnegara Regency. The analysis carried out in this study is the Land Use and Land Cover Changes (LULCC) to determine changes in land cover and analysis of Location Quotient (LQ) and Shift Share to observe the economic potential in Banjarnegara Regency. The results show that there is quite a high deforestation in Banjarnegara Regency. This can be seen from the decrease in vegetation area, from 85870.776 ha to 78,545.131 ha. Three points of the area experiencing the phenomenon of deforestation occurred in the Districts of Batur, Kalibening, Wanadadi and Bawang. The scheme that needs to be done is to apply the concept of a green economy in these areas to develop the potential of natural resources including the development of agriculture, fisheries, and forests while still paying attention to environmental ecology.

***Keywords*:** *deforestation, green economy, development.*

PENDAHULUAN

Salah satu faktor yang menyebabkan terjadinya deforestasi setiap tahunnya adalah peningkatan jumlah penduduk (Salsabila & Nurwati, 2020). Fenomena ini memberikan efek pada peningkatan aktivitas dan kebutuhan akan lahan sehingga berpotensi menyebabkan deforestasi besar-besaran yang dapat menurunkan kelestarian hutan. Pinton dan Pélissier (1989) mendefinisikan manusia sebagai mediator yang mensosialisasikan ruang dan waktu. Realitas yang dilakukan manusia harus memaksakan diri untuk mencapai target tertentu yang berkaitan dengan ekonomi. Hal ini memberikan dampak tertentu terhadap kesehatan lingkungan setempat karena upaya manusia dalam memenuhi kebutuhan sehari-hari. Kepadatan penduduk di pedesaan yang masih asri dapat mempengaruhi tingkat kerawanan lahan menjadi tidak stabil (Harjadi et al., 2017). Tingkat vegetasi yang lebat menjadi tidak terkendali untuk aktivitas manusia yang semakin meningkat baik dalam mengubah lahan menjadi pusat pemukiman maupun lahan pertanian.

Deforestasi mengarah pada bentuk ketegangan dan kekeringan yang kuat (Voldoire & Royer, 2004). Menurut Giambelluca (2002), deforestasi tidak selalu berarti perubahan hutan menjadi lahan gundul/kosong. Fenomena perubahan lahan dari fungsi lindung menjadi fungsi budidaya semakin berkembang dan dapat menyebabkan terjadinya perubahan penggunaan lahan dan tutupan lahan atau dikenal *Land Use and Land Cover Changes* (LULCC) (Sejati, Buchori, & Rudiarto, 2019). Kabupaten Banjarnegara merupakan salah satu kabupaten yang mengalami fenomena perubahan lahan dari fungsi lindung ke fungsi budi daya. Luasan hutan di Kabupaten Banjarnegara terus berkurang, dalam kurun waktu lima tahun yaitu tahun 2001 hingga 2015 setidaknya 3.840 ha hutan telah beralih fungsi menjadi lahan pertanian maupun perumahan warga (Rizkiansyah, 2020). Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), pada tahun 2018 luasan hutan yang terdapat di Kabupaten Banjarnegara mencapai 17.135,15 ha. Luasan di atas mendapati penurunan dibanding tahun 2012 yang mencapai 17.754,48 ha. Perubahan fungsi hutan menjadi pertanian maupun

perumahan warga yang tidak sesuai peruntukannya tersebut dapat mengubah kondisi ekologi lahan. Deforestasi yang terjadi di Kabupaten Banjarnegara mengikis luasan hutan yang berfungsi sebagai pelindung dan pada akhirnya menyebabkan berbagai bencana seperti longsor maupun banjir.

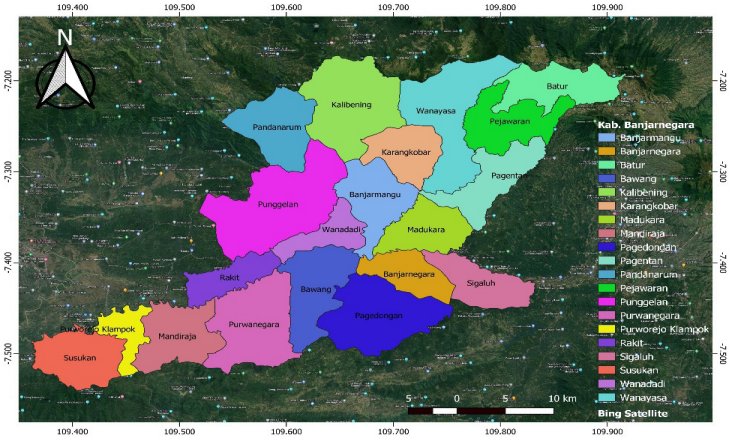
Upaya penanganan untuk mengantisipasi dampak dari deforestasi harus segera dilakukan untuk mengurangi terjadi berbagai bencana di Kabupaten Banjarnegara. Pemetaan kawasan yang mengalami deforestasi perlu dilakukan untuk mengetahui kawasan yang perlu diberikan penanganan khusus untuk dapat mengantisipasi terjadinya bencana namun tetap memperhatikan pembangunan ekonomi wilayah yang responsif terhadap lingkungan. Ekonomi hijau yaitu suatu paham mengenai pembangunan ekonomi yang mengedepankan wawasan dan keberlanjutan lingkungan (Prabowo, Nafi, & Ridjal, 2022). Ekonomi hijau juga menjadi kebijakan pertama yang mengadopsi penyediaan energi dengan memperhatikan kebutuhan dengan biaya lingkungan dan sosial terendah. Tujuannya adalah untuk memastikan terciptanya pembangunan berkelanjutan sesuai dengan target society 5.0 (Nurdoğan, & Arıöz, 2022). Konsep ekonomi hijau perlu diposisikan kembali untuk dapat mengatasi permasalahan deforestasi yang terjadi di Kabupaten Banjarnegara. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi fenomena deforestasi, serta menganalisis kawasan yang mengalami deforestasi di Kabupaten Banjarnegara. Selain itu, pada akhir penelitian ini dikaji pula strategi penanganan yang mengedepankan konsep ekonomi hijau untuk mengatasi permasalahan deforestasi di Kabupaten Banjarnegara.

METODE PENELITIAN

1. Area Studi

Area studi penelitian ini meliputi seluruh wilayah di Kabupaten Banjarnegara. Secara administrasi Kabupaten Banjarnegara memiliki luas 114.943,61 ha yang terbagi dalam 20 kecamatan dan 264 desa. Batas wilayah Kabupaten Banjarnegara meliputi : sebelah utara berdampingan dengan Kabupaten Pekalongan dan Batang; bagian selatan dibatasi Kabupaten Kebumen; bagian barat berbatasan dengan

Kabupaten Purbalingga; batas bagian timur adalah Kabupaten Wonosobo. Secara historis, Kabupaten Banjarnegara sering mengalami bencana terutama longsor (Susanti, Miardini, & Harjadi, 2017). Hal tersebut dapat terjadi karena Kabupaten Banjarnegara sebagian besar wilayahnya rawan terhadap longsor. Berdasarkan geografis, Setiadi (2013) membagi wilayah Banjarnegara menjadi tiga zona, yaitu 1) wilayah pegunungan tinggi Dieng dan wilayah pegunungan Serayu Utara merupakan Zona Utara; 2) kawasan depresi Serayu yang merupakan Zona Tengah; dan 3) pegunungan Serayu yang masuk ke Zona Selatan. Lebih jelasnya terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Administrasi Kabupaten Banjarnegara

2. Data Penelitian

Data yang diaplikasikan dalam penelitian ini, antara lain adalah citra *Landsat* pada tahun 2009, 2015, dan 2022. Selain itu, batas area administrasi Kabupaten Banjarnegara, data jaringan jalan, potensi energi, maupun data lain yang mendukung untuk pembuatan peta penggunaan dan tutupan lahan *(LULC).* Selain data terkait pemetaan, diperlukan data perkembangan produk regional bruto di Kabupaten Banjarnegara sebagai input dalam analisis *Location Quotient* (LQ) dan *Shift Share.*

3. Analisis Data

Analisis data pada penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu pengolahan peta dasar, analisis deforestasi aktual, serta analisis LQ dan *Shift Share.* Pengolahan peta dasar dilakukan dengan menginput data penelitian *Shapefile* (SHP) maupun citra *Landsat* dan diolah menggunakan perangkat lunak (*software*) *QGIS 3.22.4.* Analisis selanjutnya adalah analisis deforestasi aktual yang dilakukan dengan skema deteksi perubahan berupa teknik *post classification comparison.* Teknik tersebut merupakan teknik yang bertujuan untuk membandingkan tutupan hutan dan yang bukan hutan pada masing-masing citra *Landsat* tahun 2009, 2015, dan 2022. Analisis ini memperlihatkan areal deforestasi dan juga luasan perubahan tutupan lahan dari yang awalnya hutan menjadi lahan selain hutan, dalam hal ini peneliti mengklasifikasikan menjadi kawasan badan air, hutan, tanah kosong, hunian, dan kawasan terbangun. Analisis selanjutnya adalah Analisis LQ dan *Shift Share.* Analisis LQ adalah untuk menentukan sektor ekonomi basis (ekspor) dan non-basis. Hasil dari perhitungan analisis LQ hanya digunakan untuk mendeteksi struktur ekonomi. Selanjutnya adalah Analisis *Shift-Share*, yaitu suatu gambaran pertumbuhan ekonomi wilayah guna mendeteksi faktor-faktor yang menentukan pertumbuhan ekonomi.

PEMBAHASAN

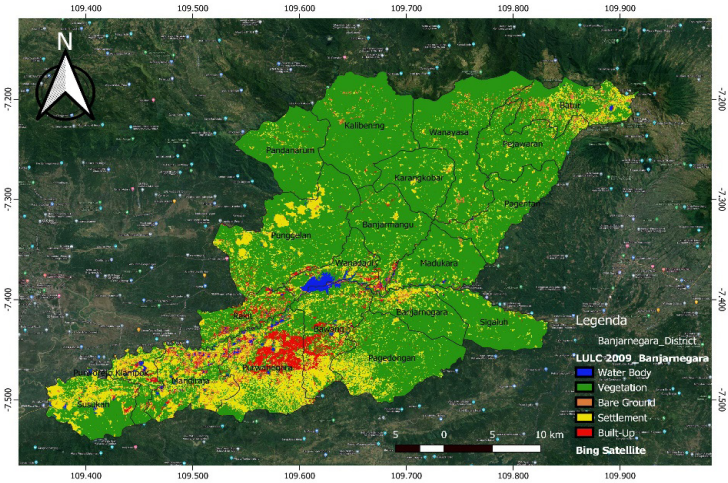
Deforestasi merupakan kondisi dimana tingkat luasan kawasan hutan mengalami penurunan secara kualitas dan kuantitas. Penurunan kualitas dan kuantitas kawasan hutan dapat terjadi akibat adanya aktivitas manusia berupa pembukaan lahan dengan cara merusak hutan guna memenuhi kebutuhan akan pertanian maupun permukiman (Shafitri, Prasetyo, & Hani'ah, 2018). Kabupaten Banjarnegara merupakan suatu kabupaten di Provinsi Jawa Tengah yang mengalami fenomena deforestasi cukup tinggi.

Berdasarkan kesimpulan penguraian tutupan lahan di Kabupaten Banjarnegara memaparkan tersemat lima klasifikasi tutupan lahan, yaitu kawasan badan air, hutan, tanah kosong, hunian, dan kawasan terbangun. Fenomena deforestasi dapat

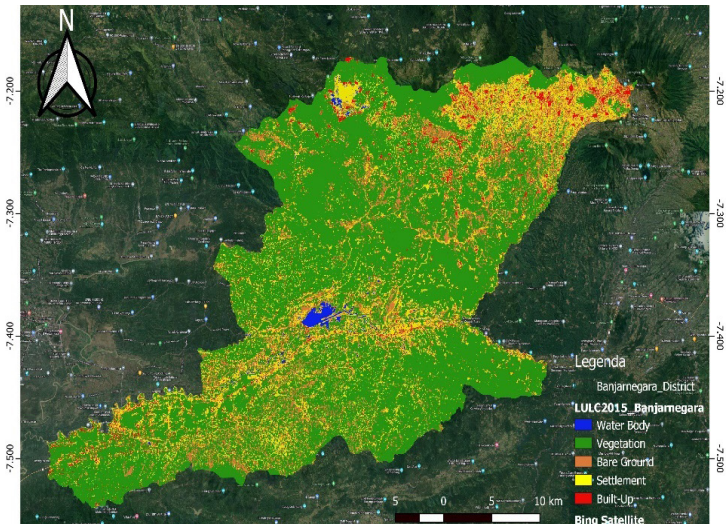
dilihat melalui analisis perubahan tutupan lahan di Kabupaten Banjarnegara antara kurun waktu 2009 hingga 2022. Analisis perubahan tutupan lahan di Kabupaten Banjarnegara dari periode 2009 sampai 2022 menunjukkan adanya penurunan luas tutupan hutan sebesar 7.325,645 ha atau sebesar 6,37% dari total luas lahan keseluruhan. Luasan tutupan lahan vegetasi atau hutan pada tahun 2009 mencapai 85.870,776 ha kemudian 82.750,660 ha pada tahun 2015 hingga pada tahun 2022 terus menurun menjadi 78.545,131 ha. Penurunan luasan tutupan lahan hutan tersebut terjadi karena adanya peningkatan aktivitas manusia untuk melakukan pembukaan lahan baik pertanian maupun lahan-lahan terbangun. Untuk lebih jelasnya terkait data pengukuran luasan tutupan lahan yang terdapat di Kabupaten Banjarnegara dapat terlihat pada Gambar 2 dan 3. serta Tabel 1. berikut ini.

Tabel 1. Perubahan Luas Area Hutan Kabupaten Banjarnegara Tahun 2009-2022 Berdasarkan Analisis Perubahan Tutupan Lahan (LULCC)

Klasifikasi Tutupan Lahan	Luas Total (Ha)		
	2009	2015	2022
Kawasan Badan Air (*Water Body*)	1.212,285	891,417	1.913,226
Kawasan Hutan (*Vegetation*)	85.870,776	82.750,660	78.545,131
Lahan Kosong (*Bare Ground*)	3.202,842	8.267,620	18.371,687
Permukiman (*Settlement*)	20.510,371	18.502,508	5.495,892
Kawasan Terbangun (*Built-Up*)	4.163,057	4.498,126	10.633,395
Total	114.959,331	114.959,331	114.959,331



Gambar 2. Peta Tutupan Lahan (LULC) Kabupaten Banjarnegara Tahun 2009



Gambar 3. Peta Tutupan Lahan (LULC) Kabupaten Banjarnegara Tahun 2015

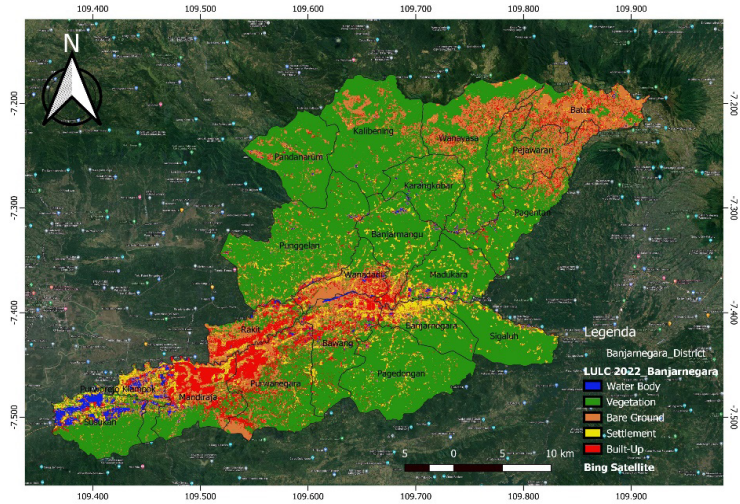
Selain menganalisis luasan perubahan tutupan lahan menggunakan data dari LULC, penulis juga melakukan analisis dengan melihat data pada BPS. Setiap tahun penurunan luasan kawasan hutan terus terjadi, hal tersebut dapat dicermati dalam data BPS pada Tabel 2. Berdasarkan data BPS, luasan kawasan hutan di tahun 2018 berkurang sebanyak 619,33 hektare dibandingkan dengan tahun 2012. Meski demikian, belum terdapat pemetaan titik-titik lokasi dari deforestasi yang terjadi di Kabupaten Banjarnegara. Bentuk tutupan lahan yang dapat dicakup oleh citra satelit adalah kawasan hutan (Ramdhoni, Fitriani, & Afif, 2018).

Tabel 2. Perubahan Luas Kawasan Hutan Kabupaten Banjarnegara Tahun 2012-2018 berdasarkan Badan Pusat Statistik (BPS)

Tahun	Fungsi Hutan			Luas Total Kawasan Hutan
	Suaka Alam Hutan Wisata (Ha)	Hutan Lindung (Ha)	Hutan Produksi (Ha)	
2018	32,10	2.129,47	13.874,67	17.136,15
2017	-	2.071,47	15.064,71	17.136,18
2016	-	2.112,76	15.023,42	17.136,18
2015	58,90	3.317,08	11.485,47	17.302,58
2014	58,90	3.317,08	11.485,47	17.302,58
2013	58,90	3.556,11	13.737,57	17.302,58
2012	58,90	1.991,83	15.703,75	17.754,48

Sumber : BPS Kabupaten Banjarnegara, 2022

Menurut Ardiansyah dan Buchori (2014), proses pengelompokan piksel pada suatu citra satelit dapat menginterpretasikan suatu bentang alam atau tutupan lahan yang spesifik. Pemetaan deforestasi yang terjadi di Kabupaten Banjarnegara dilakukan dengan melihat perubahan tutupan lahan dari yang awalnya berfungsi sebagai hutan menjadi non hutan. Hasil pemetaan deforestasi dapat terlihat dalam Gambar 4. sebagai berikut.



Gambar 4. Peta Tutupan Lahan (LULC) Kabupaten Banjarnegara Tahun 2022

Berdasarkan Gambar 4. terlihat bahwa adanya titik-titik lokasi yang mengindikasikan adanya kegiatan pembukaan lahan hutan atau deforestasi. Hasil wawancara dengan stakeholder terkait juga menyebutkan bahwa pada titik-titik lokasi tersebut terjadi perubahan tutupan lahan dari yang awalnya hutan menjadi pertanian, pertambangan, maupun permukiman. Titik pertama diidentifikasi adalah kawasan hutan yang terdapat di Kecamatan Batur, daerah ini dikenal sebagai penghasil kentang terbaik di Kabupaten Banjarnegara. Perubahan penggunaan lahan yang terjadi di Kecamatan Batur terjadi akibat meningkatnya kegiatan pertanian produksi berupa tanaman kentang. Tanaman kentang merupakan tanaman yang berakar pendek sehingga tidak dapat menjadi tanaman pelindung dari bahaya bencana erosi maupun tanah longsor (Respatiadi, 2017). Perubahan fungsi tutupan lahan tersebut tentunya mempengaruhi keseimbangan ekologis daerah sekitarnya. Dua titik lokasi yang diidentifikasi mengalami deforestasi yaitu di Kecamatan Kalibening, Wanadadi dan Bawang. Kedua titik lokasi tersebut mengalami perubahan tutupan lahan dari hutan menjadi

kawasan pertambangan. Tidak adanya upaya pelestarian lingkungan pasca kegiatan pertambangan menjadikan kedua kawasan di sekitar pertambangan mengalami permasalahan lingkungan yang cukup serius.

Guna mengatasi permasalahan lingkungan Kabupaten Banjarnegara diperlukan upaya penanganan yang komprehensif. Konsep ekonomi hijau dapat melindungi efek buruk dari permasalahan lingkungan (Morrissey, 2012). Menurut Buiter (2012), penerapan ekonomi hijau diasumsikan sebagai pencapaian pertumbuhan dan pembangunan ekonomi dengan cara mengelola sumber daya secara berkelanjutan. Departemen Energi dan Perubahan Iklim, Ofgem (2011), menyampaikan restrukturasi ekonomi hijau pada suatu kawasan melibatkan beberapa aspek, diantaranya adalah:

1. Penentuan sumber daya potensial dan penetapan harga eksternalitas dalam jangka panjang;
2. Inovasi sebagai sarana pendukung ramah lingkungan;
3. Pembentukan jalur pertumbuhan yang ramah lingkungan;
4. Penciptaan *win-win solutions* melalui pergeseran dan perubahan serta perubahan sektoral.

Salah satu usaha yang dapat diaplikasikan untuk menanggulangi dampak negatif berlebih dari deforestasi yang terjadi di Kabupaten Banjarnegara adalah mengembangkan konsep pembangunan ekonomi hijau yang responsif terhadap lingkungan. Sebelum menentukan strategi pembangunan ekonomi hijau, diperlukan penentuan sumber daya potensial pada suatu kawasan. Analisis LQ dan analisis *Shift Share,* kerap kali dipakai untuk mencari potensi sumber daya yang terdapat di suatu wilayah.

Analisis LQ diusung guna mengetahui sektor basis dalam suatu kawasan, dalam penelitian ini adalah Kabupaten Banjarnegara. Pada analisis ini menggunakan data Produk Domestik Regional Bruto Atas Dasar Harga Konstan (PDRB ADHK) tahun 2017-2021 Kabupaten Banjarnegara dan Provinsi Jawa Tengah. Sektor dapat dikatakan menjadi basis apabila mampu mencukupi kebutuhan/permintaan pasar di dalam wilayah maupun memenuhi ekspor luar wilayah. Sedangkan sektor non-basis, merupakan sektor anggap hanya dapat memenuhi kebutuhan permintaan di dalam wilayah. Untuk menentukan suatu sumber daya/sektor merupakan sektor basis maka perlu

meninjau pada nilai LQ yang diperoleh oleh tiap-tiap sektor. Suatu sektor dapat dikatakan sebagai sektor basis apabila sektor tersebut mempunyai nilai LQ ≥ 1, sebaliknya, sektor non basis merupakan sektor yang mempunyai nilai LQ < 1. Berikut merupakan Tabel 3. menampilkan LQ rata-rata di Kabupaten Banjarnegara.

Tabel 3. Analisis LQ Kabupaten Banjarnegara Tahun 2017-2021

NO	SEKTOR	LQ						KET
		2017	2018	2019	2020	2021	2017-2021	
1.	Pertanian, Kehutanan, dan Perikanan	2,19	2,21	2,25	2,23	2,24	2,23	BASIS
2.	Pertambangan dan Penggalian	2,38	2,39	2,39	2,38	2,37	2,38	BASIS
3.	Industri Pengolahan	0,39	0,40	0,40	0,41	0,42	0,40	NON BASIS
4.	Pengadaan Listrik , Gas	0,32	0,32	0,33	0,32	0,32	0,32	NON BASIS
5.	Pengadaan Air	0,68	0,68	0,67	0,67	0,66	0,67	NON BASIS
6.	Konstruksi	0,67	0,67	0,67	0,69	0,69	0,68	NON BASIS
7.	Perdagangan Besar dan Eceran, dan Reparasi Mobil dan Sepeda Motor	1,16	1,16	1,16	1,13	1,14	1,15	BASIS
8.	Transportasi dan Pergudangan	1,28	1,27	1,25	1,30	1,30	1,28	BASIS

NO	SEKTOR	LQ						KET
		2017	2018	2019	2020	2021	2017-2021	
9.	Penyedia Akomodasi dan Makan Minum	0,66	0,66	0,66	0,66	0,67	0,66	NON BASIS
10.	Informasi dan Komunikasi	0,83	0,83	0,82	0,78	0,78	0,81	NON BASIS
11.	Jasa Keuangan	1,04	1,03	1,03	1,02	1,01	1,03	BASIS
12.	Real Estate	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,94	NON BASIS
13.	Jasa Perusahaan	1,046	1,039	1,035	1,024	1,025	1,034	BASIS
14.	Administrasi Pemerintahan, Pertahanan dan Jaminan Sosial Wajib	1,35	1,33	1,31	1,29	1,29	1,31	BASIS
15.	Jasa Pendidikan	1,50	1,51	1,50	1,48	1,48	1,49	BASIS
16.	Jasa Kesehatan dan Kegiatan Sosial	1,56	1,56	1,56	1,52	1,52	1,55	BASIS
17.	Jasa Lainnya	1,49	1,49	1,51	1,49	1,49	1,49	BASIS

Keterangan:

1. Jika LQ ≥ 1 memiliki makna sektor basis, bermakna sektor tersebut dapat mencukupi kebutuhan/permintaan pasar di dalam wilayah dan juga memenuhi kriteria ekspor ke luar wilayah.
2. Jika LQ < 1 memiliki makna sektor non-basis, bermakna bahwa sektor tersebut hanya memenuhi kebutuhan permintaan pasar di dalam wilayah.

Jika dilihat dari tabel mengenai perhitungan rata-rata LQ, sektor basis dan non basis di Kabupaten Banjarnegara tahun 2017 sampai dengan 2021 tidak mengalami perubahan. Berdasarkan tabel perhitungan rata-rata LQ, didapatkan informasi bahwa dalam kurun waktu 2017 sampai dengan 2021 terdapat sepuluh sektor yang menjadi sektor basis. Nilai LQ paling tinggi diperoleh sektor Pertanian, Kehutanan, dan Perikanan, kemudian menyusul setelahnya sektor Pertambangan dan Penggalian. Berikut merupakan daftar sektor basis yang terdapat di Kabupaten Banjarnegara, yaitu :

1. Pertanian, Kehutanan, dan Perikanan;
2. Pertambangan dan Penggalian;
3. Perdagangan Besar dan Eceran, dan Reparasi Mobil dan Sepeda Motor;
4. Transportasi dan Pergudangan;
5. Jasa Keuangan;
6. Jasa Perusahaan;
7. Administrasi Pemerintahan, Pertahanan dan Jaminan Sosial Wajib;
8. Jasa Pendidikan;
9. Jasa Kesehatan dan Kegiatan Sosial; dan
10. Jasa Lainnya.

Sedangkan sektor non basis di Kabupaten Banjarnegara sebanyak tujuh sektor dengan sektor yang mengantongi nilai LQ paling rendah meliputi sektor Pengadaan Listrik, Gas. Berikut merupakan daftar sektor non basis di Kabupaten Banjarnegara, yaitu :

1. Industri Pengolahan;
2. Pengadaan Listrik, Gas;
3. Pengadaan Air;
4. Konstruksi;
5. Penyedia Akomodasi dan Makan Minum;
6. Informasi dan Komunikasi; dan
7. Real Estate.

Bentuk pertumbuhan ekonomi wilayah yang berguna mendeteksi unsur determinan pertumbuhan ekonomi dalam suatu kawasan dapat diketahui dengan melakukan Analisis *Shift Share*. Selain itu, analisis *Shift Share* dipergunakan untuk

mengetahui sektor unggulan pada suatu wilayah. Perhitungan ini menggunakan data Produk Domestik Regional Bruto Atas Dasar Harga Konstan (PDRB ADHK) Kabupaten Banjarnegara dan Produk Domestik Regional Bruto Atas Dasar Harga Konstan (PDRB ADHK) Jawa Tengah per sektor tahun 2017 dan tahun 2021. Dibawah ini merupakan perhitungan *Shift Share* Kabupaten Banjarnegara dan Provinsi Jawa Tengah.

Tabel 4. Analisis Shift Share Kabupaten Banjarnegara Tahun 2017-2021

NO	SEKTOR	KPP	KPPW	KPP + KPPW (PB)	KETERANGAN
1.	Pertanian, Kehutanan, dan Perikanan	-4,26%	4,27%	0,01%	**MAJU**
2.	Pertambangan dan Penggalian	-1,91%	1,64%	-0,27%	MUNDUR
3.	Industri Pengolahan	-3,69%	9,14%	5,45%	**MAJU**
4.	Pengadaan Listrik , Gas	8,27%	0,92%	9,19%	**MAJU**
5.	Pengadaan Air	6,92%	-0,42%	6,50%	**MAJU**
6.	Konstruksi	3,44%	4,96%	8,40%	**MAJU**
7.	Perdagangan Besar dan Eceran, dan Reparasi Mobil dan Sepeda Motor	2,49%	-0,39%	2,10%	**MAJU**
8.	Transportasi dan Pergudangan	-30,09%	2,46%	-27,62%	MUNDUR
9.	Penyedia Akomodasi dan Makan Minum	3,39%	3,14%	6,52%	**MAJU**

NO	SEKTOR	KPP	KPPW	KPP + KPPW (PB)	KETERANGAN
10.	Informasi dan Komunikasi	42,27%	-6,64%	35,63%	**MAJU**
11.	Jasa Keuangan	-0,25%	-0,25%	-0,50%	MUNDUR
12.	Real Estate	1,92%	-0,97%	0,95%	MAJU
13.	Jasa Perusahaan	4,18%	-0,22%	3,97%	**MAJU**
14.	Administrasi Pemerintahan, Pertahanan dan Jaminan Sosial Wajib	-6,34%	-2,50%	-8,83%	MUNDUR
15.	Jasa Pendidikan	4,15%	0,17%	4,32%	**MAJU**
16.	Jasa Kesehatan dan Kegiatan Sosial	14,27%	-1,05%	13,22%	**MAJU**
17.	Jasa Lain Lain	-1,24%	2,38%	1,14%	MAJU

Keterangan :

a. Kriteria interpretasi besaran Pergeseran Bersih (PB)
   1) Apabila besaran PB ≥ merupakan sektor x dikatakan maju.
   2) Apabila besaran PB < merupakan sektor x mundur.

b. Kriteria Interpretasi nilai KPP
   1) KPP bernilai positif (KPP > 0) pada wilayah/daerah yang berspesifikasi dalam sektor yg secara nasional tumbuh cepat.
   2) KPP bernilai negatif (KPP < 0) pada wilayah/daerah yang berspesifikasi dalam sektor yg secara nasional tumbuh lambat.

c. Kriteria Interpretasi nilai KPPW
   1) KPPW bernilai positif (KPPW > 0) pada sektor yang didapat mempunyai keunggulan daya saing (comparative advantage) di wilayah /daerah tsb atau sering disebut juga sebagai keuntungan lokasional.
   2) KPPW bernilai negatif (KPPW < 0) pada sektor yang tidak didapat memiliki keunggulan daya saing

Data perhitungan analisis *Shift Share* menunjukkan perhitungan KPN, KPP maupun KPPW, dapat digunakan guna mengidentifikasi sektor-sektor di Kabupaten Banjarnegara yang memiliki keunggulan guna majukan perekonomian di Kabupaten Banjarnegara dan Jawa Tengah. Hasil analisis *Shift Share* Kabupaten Banjarnegara dan Provinsi Jawa Tengah memperlihatkan bahwa ada 13 sektor yang masuk sebagai sektor maju atau progresif. Sekor-sektor maju atau progresif di Kabupaten Banjarnegara antara lain:

1. Pertanian, Kehutanan, dan Perikanan
2. Industri Pengolahan
3. Pengadaan Listrik , Gas
4. Pengadaan Air
5. Konstruksi
6. Perdagangan Besar dan Eceran, dan Reparasi Mobil dan Sepeda Motor
7. Penyedia Akomodasi dan Makan Minum
8. Informasi dan Komunikasi
9. Real Estate
10. Jasa Perusahaan
11. Jasa Pendidikan
12. Jasa Kesehatan dan Kegiatan Sosial
13. Jasa Lainnya

Berdasarkan tiga belas sektor yang maju atau progresif, sektor yang berkontribusi paling besar di Kabupaten Banjarnegara yaitu sektor Informasi dan Komunikasi. Sektor yang termasuk di dalam kategori mundur dan menyumbang kontribusi paling rendah adalah sektor Transportasi dan Pergudangan.

Analisis selanjutnya adalah analisa sektor perekonomian yang unggul yaitu analisis kolaborasi dari analisis LQ dan *Shift Share* yang dipergunakan guna menelaah sektor yang bisa memaksimalkan perekonomian wilayah. Data hasil perhitungan rata-rata LQ selama 5 tahun dan *Shift Share* dibutuhkan dalam analisis ini. Analisis sektor ekonomi unggulan Kabupaten Banjarnegara dijabarkan dalam tabel berikut.

Tabel 5. Analisis Shift Share Kabupaten Banjarnegara
Tahun 2017-2021

NO	SEKTOR	RATA-RATA LQ	LQ	PROSENTASE PB	PB	TIPOLOGI SEKTOR
1.	Pertanian, Kehutanan, dan Perikanan	2,23	≥1	0,01%	>0	**Sektor Unggulan**
2.	Pertambangan dan Penggalian	2,38	≥1	-0,27%	<0	Sektor Potensial
3.	Industri Pengolahan	0,40	<1	5,45%	>0	Sektor Berkembang
4.	Pengadaan Listrik , Gas	0,32	<1	9,19%	>0	Sektor Berkembang
5.	Pengadaan Air	0,67	<1	6,50%	>0	Sektor Berkembang
6.	Konstruksi	0,68	<1	8,40%	>0	Sektor Berkembang
7.	Perdagangan Besar dan Eceran, dan Reparasi Mobil dan Sepeda Motor	1,15	≥1	2,10%	>0	**Sektor Unggulan**
8.	Transportasi dan Pergudangan	1,28	≥1	-27,62%	<0	Sektor Potensial
9.	Penyedia Akomodasi dan Makan Minum	0,66	<1	6,52%	>0	Sektor Berkembang
10.	Informasi dan Komunikasi	0,81	<1	35,63%	>0	Sektor Berkembang
11.	Jasa Keuangan	1,03	≥1	-0,50%	<0	Sektor Potensial

NO	SEKTOR	RATA-RATA LQ	LQ	PROSENTASE PB	PB	TIPOLOGI SEKTOR
12.	Real Estate	0,94	<1	0,95%	<0	Sektor Terbelakang
13.	Jasa Perusahaan	1,034	≥1	3,97%	>0	**Sektor Unggulan**
14.	Administrasi Pemerintahan, Pertahanan dan Jaminan Sosial Wajib	1,31	≥1	-8,83%	<0	Sektor Potensial
15.	Jasa Pendidikan	1,49	≥1	4,32%	>0	**Sektor Unggulan**
16.	Jasa Kesehatan dan Kegiatan Sosial	1,55	≥1	13,22%	>0	**Sektor Unggulan**
17.	Jasa Lainnya	1,49	≥1	1,14%	>0	Sektor Unggulan

Keterangan :

Sektor Unggulan/ Sektor Basis & Berdaya Saing	=	Jika rata-rata LQ ≥1 dan Prosentase PB >0
Sektor Potensial/ Sektor Basis & Tidak Berdaya Saing	=	Jika rata-rata LQ ≥1 dan Prosentase PB <0
Sektor Berkembang/ Sektor Non-Basis & Berdaya Saing	=	Jika rata-rata LQ<1 dan Prosentase PB >0
Sektor Terbelakang/ Sektor Non-Basis & Tidak Berdaya Saing	=	Jika rata-rata LQ <1 dan Prosentase PB <0

Tabel tipologi sektor berdasarkan LQ dan *Shift Share* menunjukkan bahwa Kabupaten Banjarnegara terdapat 4 sektor unggulan, 4 sektor yang tergolong potensial, 4 sektor termasuk berkembang, dan 1 sektor terbelakang. Sektor unggulan di Kabupaten Banjarnegara, yaitu:

1. Pertanian, Kehutanan, dan Perikanan;
2. Perdagangan Besar dan Eceran, dan Reparasi Mobil dan Sepeda Motor;
3. Jasa Perusahaan;
4. Jasa Pendidikan;
5. Jasa Kesehatan dan Kegiatan Sosial;
6. Jasa Lainnya.

Sektor potensial pada Kabupaten Banjarnegara, antara lain:

1. Pertambangan dan Penggalian;
2. Transportasi dan Pergudangan;
3. Jasa Keuangan;
4. Administrasi Pemerintahan, Pertahanan dan Jaminan Sosial Wajib.

Sektor yang menjadi sektor berkembang, yaitu:

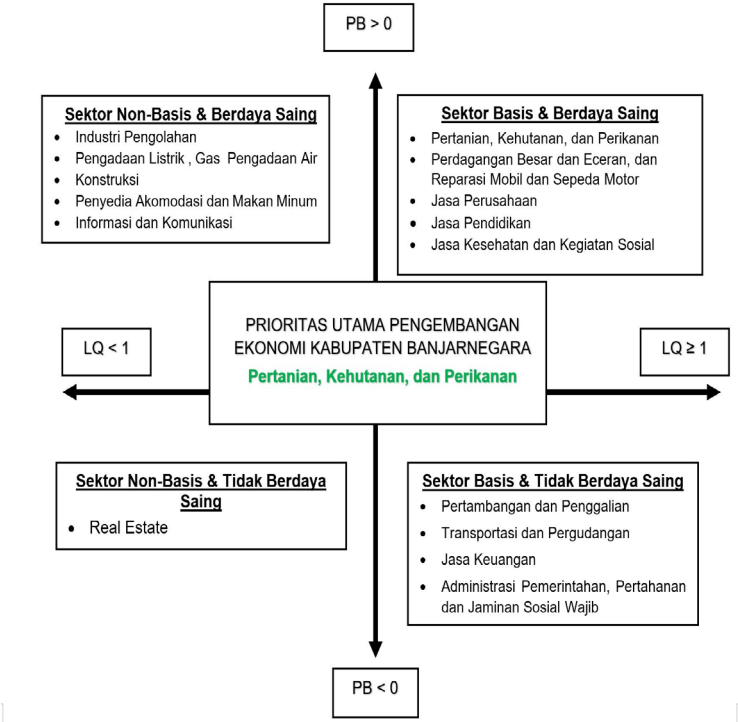
1. Industri Pengolahan;
2. Pengadaan Listrik, Gas;
3. Pengadaan Air;
4. Konstruksi;
5. Penyedia Akomodasi dan Makan Minum;
6. Informasi dan Komunikasi.

Sektor terbelakang di Kabupaten Banjarnegara karena baik nilai LQ maupun PB sektor tersebut memiliki nilai di bawah standar ialah sektor Real Estate.

Pengutamaan sektor unggulan yaitu khususnya dalam sektor Pertanian, Kehutanan, dan Perikanan adalah pengembangan, meskipun nilai LQ maupun PB sektor tersebut bukan yang tertinggi akan tetapi kondisi dan karakteristik Kabupaten Banjarnegara sangat mendukung untuk menjadikan sektor Pertanian, Kehutanan, dan Perikanan menjadi sektor prioritas utama untuk dikembangkan. Sektor lainnya yang menjadi prioritas pengembangan di Kabupaten Banjarnegara

antara lain adalah Perdagangan Besar dan Eceran, dan Reparasi Mobil dan Sepeda Motor; Jasa Perusahaan; Jasa Pendidikan; Jasa Kesehatan dan Kegiatan Sosial; dan Jasa Lainnya. Lima sektor tersebut menjadi prioritas pengembangan karena nilai ≥1 dan persentase PB >0 dimana seluruhnya bergerak di bidang jasa yang merupakan sektor yang memiliki *demand* atau permintaan tinggi di Kabupaten Banjarnegara. Berikut merupakan skema analisis prioritas dalam pengembangan sektor di Kabupaten Banjarnegara yang dapat dilihat pada Gambar 5.

Analisis LQ dan *Shift Share* berguna dalam menentukan sumber daya potensial yang bisa dikembangkan di suatu wilayah. Hasil analisis LQ dan *Shift Share* Tahun 2017-2021 Kabupaten Banjarnegara memperlihatkan bahwa Pertanian, Kehutanan, maupun Perikanan menjadi sektor prioritas utama yang perlu dikembangkan. Hal tersebut sejalan dengan tujuan penataan ruang Kabupaten Banjarnegara yang tertuang dalam Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten Banjarnegara Tahun 2011-2031. Penataan ruang daerah Kabupaten Banjarnegara bertujuan menciptakan Ruang Kabupaten dengan basis pertanian dan pariwisata yang unggul dalam suatu sistem zona terpadu dan berkelanjutan. Pengembangan potensi sumber daya alam (SDA) yang didapat di Kabupaten Banjarnegara perlu didorong untuk terus dikelola dengan baik guna dapat mendukung perekonomian masyarakat.



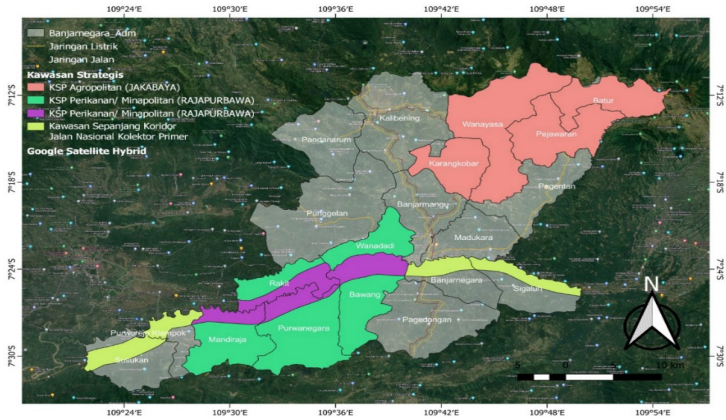
Gambar 5. Prioritas Pengembangan Ekonomi di Kabupaten Banjarnegara

Konsep ekonomi hijau memiliki kerangka dasar yang menganggap lingkungan sebagai modal yang menyediakan bahan utama untuk produksi dan konsumsi. Penerapan konsep ekonomi hijau dalam mengembangkan potensi sumber daya alam (SDA) untuk meningkatkan perekonomian diharapkan dapat mampu mencegah kegiatan eksploitasi alam yang tidak berkelanjutan (Prabowo et al., 2022). Permasalahan pengembangan pertanian yang terjadi di Kabupaten Banjarnegara perlu ditindaklanjuti dengan pengelolaan yang baik dengan membuat kawasan-kawasan strategis khusus dan juga penerapan metode tanam tumpang sari sehingga dapat mengurangi kerusakan lingkungan.

Sesuai arahan pada RTRW Kabupaten Banjarnegara memiliki tiga Kawasan Strategis, yaitu:

1. KSP Agropolitan (JAKABAYA); terletak di Kecamatan Pejawaran, Kecamatan Karangkobar, Kecamatan Batur, dan Kecamatan Wanayasa;
2. KSP Minapolitan/Perikanan (RAJAPURBAWA); terletak di Kecamatan Rakit, Kecamatan Mandiraja, Kecamatan Purwonegoro, Kecamatan Bawang, Wanadadi; dan
3. Kawasan Sepanjang Koridor Jalan Nasional Kolektor Primer.

Gambaran lebih jelasnya tentang rencana kawasan-kawasan strategis pengembangan ekonomi sesuai dengan keunggulan wilayah berdasarkan RTRW Kabupaten Banjarnegara dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Rencana Pengembangan Ekonomi di Kabupaten Banjarnegara

Berdasarkan arah pengembangan kawasan strategis yang telah tertera dalam Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW), dapat dilihat bahwa tiga dari empat kecamatan yang disinyalir mengalami fenomena deforestasi cukup tinggi turut serta masuk dalam pengembangan KSP Agropolitan maupun Minapolitan.

Kecamatan Batur merupakan kecamatan yang memiliki potensi pengembangan pertanian dengan komoditas utama kentang, dan sayur-sayuran. Sedangkan untuk Kecamatan Bawang dan Wanadadi menjadi bagian dari KSP Minapolitan karena keduanya memiliki sumber mata air yang melimpah. Kecamatan Kalibening yang memiliki fenomena deforestasi cukup tinggi ternyata tidak menjadi bagian dari kawasan strategis. Meski demikian, pada dasarnya Kecamatan Kalibening merupakan wilayah yang sangat potensial untuk dikembangkan pertanian baik sayur-sayuran maupun perkebunan teh. Melihat potensi tersebut, maka penanganan fenomena deforestasi yang dapat dilakukan diantaranya adalah sebagai berikut.

1. Melakukan konservasi terhadap kawasan-kawasan yang mengalami deforestasi sesuai dengan rencana tata ruang kawasan dan diiringi dengan inovasi untuk meningkatkan keberlanjutan ekologis lingkungan kawasan;
2. Melakukan pengembangan komoditas pertanian sesuai dengan rencana tata ruang dengan membuat kawasan produksi pertanian dan kota tani;
3. Melakukan pengaturan, pengawasan, dan pengendalian terhadap penggunaan lahan budi daya agar tidak melanggar/menggunakan lahan lindung.

Pengembangan potensi SDA di Kabupaten Banjarnegara perlu diarahkan dengan baik sesuai dengan konsep ekonomi hijau yang berwawasan lingkungan agar tetap menjamin keberlanjutan ekologis lingkungan.

KESIMPULAN

Kabupaten Banjarnegara menjadi salah satu kabupaten yang mengalami fenomena deforestasi yang cukup tinggi di Pulau Jawa. Hasil analisis deforestasi aktual yang dilakukan dengan melihat citra *Landsat* tahun 2009, 2015, dan 2022 dengan memperhatikan gambaran perubahan tutupan lahan dari yang awalnya berfungsi sebagai hutan menjadi non hutan. Hasil analisis deforestasi aktual di Kabupaten Banjarnegara pada periode 2009 hingga 2022 menunjukkan bahwa telah terjadi penurunan luas tutupan hutan sebesar 7325,645 Ha atau sebesar 6,37% dari total luas lahan keseluruhan. Jika dirinci, luasan tutupan lahan vegetasi atau hutan pada tahun 2009 mencapai

85870,776 Ha menjadi 78545,131 Ha di tahun 2022. Berdasarkan hasil pemetaan tersebut diketahui bahwa terdapat beberapa titik lokasi yang mengalami fenomena deforestasi yang cukup parah, yaitu di Kecamatan Batur, Kalibening, Wanadadi dan Bawang. Penurunan luasan tutupan lahan hutan tersebut terjadi karena adanya peningkatan aktivitas manusia untuk melakukan pembukaan lahan baik pertanian maupun lahan-lahan terbangun. Penerapan konsep ekonomi hijau menjadi strategi utama dalam pengembangan kawasan dan perbaikan kondisi lingkungan di Kabupaten Banjarnegara. Seluruh *stakeholders* terkait baik Pemerintah Daerah, masyarakat, akademisi, dunia usaha hingga media diharapkan dapat turut serta mendukung penerapan konsep ekonomi hijau di Kabupaten Banjarnegara. Rencana kawasan-kawasan strategis pengembangan ekonomi sesuai dengan potensi wilayah diperlukan untuk dapat mengarahkan pengembangan sektor ekonomi prioritas agar sesuai dengan potensi kawasannya. Pengembangan potensi sumber daya alam khususnya sektor prioritas pengembangan yaitu pertanian, perikanan, dan hutan perlu terus dilakukan dengan tetap memperhatikan ekologi lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

Ardiansyah, D. M., & Buchori, I. (2014). Pemanfaatan citra satelit untuk penentuan lahan kritis mangrove di Kecamatan Tugu, Kota Semarang. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*, 1(1), 1-12.

Buiter, W.H. (2012). The role of central banks in financial stability: How has it changed?. CEPR Discussion Paper No. 8780. *London: Centre for Economic Policy Research*.

Dyah Susanti, P., Miardini, A., & Harjadi, B. (2017). Analisis kerentanan tanah longsor sebagai dasar mitigasi di Kabupaten Banjarnegara (Vulnerability analysis as a basic for landslide mitigation in Banjarnegara Regency). *Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, *1*(1), 49–59. https://doi.org/10.20886/jppdas.2017.1.1.49-59

Giambelluca, T. W. (2002). Hydrology of altered tropical forest. *Hydrological processes*, 16(8), 1665-1669.

Morrissey, L. F. (2012). Neo-liberal conservation and the cementing of Inequality: Interview with Bram Büscher. *Development*, 55(1), 13-16.

Nurdoğan, A. K., & Arıöz, A. (2022). *The importance of green growth in the society 5.0 process*. Doğa Başar Sarıipek, 151.

Ofgem. (2011). Determination and notice of Scottish Hydro Electric Limited's transmission investment for renewable generation asset value adjusting event for "Beauly–Denny". Retrieved from http://www.ofgem.gov.uk/Networks/Trans/ElecTransPolicy/CriticalInvestments/TIRG/Documents1/Beauly%20Denny%20SHETL%20AVAE%20Determination%20FINAL.pdf.

Pinton, F., & Pélissier, P. (1989). *Tropiques: lieux et liens: florilège offert à Paul Pelissier et Gilles Sautter. B. Antheaume (Ed.)*. Ed. de l'ORSTOM.

Prabowo, R. U., Nafi, A., & Ridjal, J. A. (2022). Implementasi reposisi green economy: peningkatan kapasitas usaha rintisan masyarakat sekitar. *AGRIBIOS : Jurnal Ilmiah*, *20*(1), 129–134.

Ramdhoni, F., Fitriani, A. H., & Afif, H. A. (2018). Identifikasi deforestasi melalui pemetaan tutupan lahan di Kabupaten Banjar, Kalimantan Selatan. *Seminar Nasional Geomatika:*

Penggunaan dan Pengembangan Produk Informasi Geospasial Mendukung Daya Saing Nasional, *3*, 465–472. https://doi.org/10.24895/sng.2018.3-0.987

Respatiadi, H. (2017). *Mencegah banjir dan tanah longsor studi kasus metode alternatif pengelolaan risiko bencana di Kecamatan Kejajar, Wonosobo, Jawa Tengah*. Jakarta.

Rizkiansyah, D. N. (2020). *Potret efek domino pola pertanian di Desa Penanggungan, Kabupaten Banjarnegara dalam film dokumenter "Menyemai Benih Bencana"*. Yogyakarta: Universitas Mercu Buana Yogyakarta.

Salsabila, A. H., & Nurwati, N. (2020). Deforestasi dan migrasi penduduk ke Ibu Kota Baru Kalimantan Timur: Peran sinergis pemerintah dan masyarakat. *Prosiding Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat*, *7*(1), 27. https://doi.org/10.24198/jppm.v7i1.28259

Sejati, A. W., Buchori, I., & Rudiarto, I. (2019). The spatio-temporal trends of urban growth and surface urban heat islands over two decades in the Semarang Metropolitan Region. *Sustainable Cities and Society*, 101432. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101432

Setiadi, T. (2013). Perancangan sistem informasi geografis pemetaan daerah rawan tanah longsor, mitigasi, dan manajemen bencana di Kabupaten Banjarnegara. *Kes Mas: Jurnal Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Ahmad Daulan*, 7(1), 24898.

Shafitri, L. D., Prasetyo, Y., & Hani'ah. (2018). Analisis deforestasi hutan di Provinsi Riau dengan metode polarimetrik dalam pengindraan jauh. *Jurnal Geodesi Undip*, *7*(1), 212–222.

Susanti, P. D., Miardini, A., & Harjadi, B. (2017). Analisis kerentanan tanah longsor sebagai dasar mitigasi di Kabupaten Banjarnegara (Vulnerability analysis as a basic for landslide mitigation in Banjarnegara Regency). *Jurnal Penelitian Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (Journal of Watershed Management Research)*, 1(1), 49-59.

Voldoire, A., & Royer, J. F. (2004). Tropical deforestation and climate variability. *Climate Dynamics,* 22(8), 857-874.

DINAMIKA SPASIAL PENAMBAHAN DARATAN SERTA KORELASINYA TERHADAP LUASAN MANGROVE DI DELTA CIMANUK KABUPATEN INDRAMAYU PROVINSI JAWA BARAT

SPATIAL DYNAMICS OF LAND ADDITION AND THEIR CORRELATION TO MANGROVE AREA IN CIMANUK DELTA, INDRAMAYU REGENCY, WEST JAVA PROVINCE

Sodikin[1*], Kusuma Lelana Ari Lestari[1], Fauzi Fahmi[2]

[1]Program Studi Magister Studi Lingkungan, Pascasarjana, Universitas Terbuka
[2]Program Studi Pendidikan IPS (Geografi), FITK, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta

*sodikinn@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Wilayah pesisir merupakan wilayah yang sangat dinamis, salah satu kedinamisan di wilayah pesisir terlihat dari adanya fenomena abrasi dan akresi yang menyebabkan perubahan pada garis pantai. Perubahan garis pantai tidak jarang akan berdampak terhadap ekosistem di wilayah tersebut antara lain ekosistem mangrove yang menjadi penyeimbang wilayah pesisir. Keberadaan mangrove sangat penting untuk menunjang keseimbangan ekosistem di pesisir, perubahan garis pantai baik abrasi maupun akresi berdampak besar terhadap keberadaan mangrove. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi hubungan korelasional antara penambahan daratan dengan perluasan mangrove di Delta Cimanuk Kabupaten Indramayu. Hasil penelitian menunjukkan luasan daratan di Delta Cimanuk dari tahun 1991 sampai tahun 2021 terus mengalami peningkatan yang signifikan yaitu sebesar 742 ha, hal ini terjadi karena besarnya sedimen yang dibawa dari hulu sungai Cimanuk. Peningkatan daratan diiringi dengan adanya peningkatan luasan mangrove di kawasan ini, pada tahun 1995 luas mangrove hanya 879 ha, namun pada tahun

2021 bersamaan dengan meningkatnya luas daratan mangrove di delta Cimanuk bertambah menjadi 2.123 ha. Jenis mangrove di wilayah ini di dimoniniasi oleh jenis Rhizopora dan Avicenna Marina. Hasil analisis korelasi menunjukkan nilai koefisien (r) antara penambahan daratan dan perubahan mangrove di muara sungai Cimanuk bernilai positif yaitu 0,746 dimana hal ini menunjukkan bahwa hubungan kedua variabel tersebut memiliki tingkat hubungan yang kuat. Adapun pola hubungan yang terjadi adalah kemunculan mangrove diawali oleh adanya penambahan daratan yang masih belum stabil, kemudian ditumbuhi mangrove dan menjadi daratan yang stabil (masif).

Kata Kunci: *delta cimanuk, hubungan, mangrove, spasial*

ABSTRACT

The coastal area is a very dynamic area, the dynamics of the coastal area is caused since the coastal area is a meeting area between land and sea (interface), one of the dynamics in the coastal area can be seen from the abrasion and accretion phenomena that cause changes in the coastline in the region. Changes in coastlines will often have an impact on ecosystems in the region, including the mangrove ecosystem which is a balancing ecosystem for coastal areas. The existence of mangroves is very important to support the balance of ecosystems in coastal areas, changes in coastline both abrasion and accretion have a major impact on the existence of mangroves. This study aims to evaluate the correlational relationship between the addition of land (accretion) with the expansion of mangroves in the Cimanuk Delta, Indramayu Regency. The results of the study show that the land area in the Cimanuk Delta from 1991 to 2021 continues to increase significantly of 742 ha, this happens because of the large amount of sediment carried upstream of the Cimanuk river. The increase in land area was accompanied by an increase in the area of mangroves in this area, in 1995 the mangrove area was only 879 ha, but in 2021 along with the increase in the land area of mangroves in the Cimanuk delta it increased significantly to 2,123 ha. There are 9 types of mangroves in this area, but the most dominant are Rhizopora and Avicenna Marina. Based on the correlation analysis, the coefficient value (r) between the addition of land and changes in mangroves at the Cimanuk River estuary is positive, namely 0.746 where this shows that the relationship between the two variables has a strong relationship. The pattern of the relationship that occurs is that the emergence of mangroves begins with the addition of land that is still not stable, then it is overgrown with mangroves and becomes a

stable (massive) land. After becoming a massive land, if rarely, people change (convert) the mangrove land to become fish ponds.

Keyword**:** *cimanuk delta, relationship, mangrove, spatial*

PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki garis pantai sepanjang 95.181 km, atau terpanjang keempat dunia (Arifin, 2021). Pertemuan antara ekosistem lautan dan ekosistem daratan menyebabkan wilayah pesisir menjadi wilayah yang labil dan dinamis. Hal ini menyebabkan Indonesia rawan terhadap berbagai perubahan pesisir, salah satunya adalah perubahan garis pantai, baik berupa penyusutan (abrasi) maupun pertumbuhan daratan (akresi). Faktor penyebab terjadinya perubahan garis pantai sangat beragam, menurut Sutikno (1993), perubahan garis pantai dapat dipengaruhi oleh aktivitas manusia, jenis sedimen, serta faktor hidrooseanografi. Selain itu menurut Setyawan (2021) faktor penyebab terjadinya perubahan garis pantai dapat diakibatkan oleh adanya abrasi dan akresi. Faktor hidro-oseanografi yang juga mempengaruhi perubahan garis pantai yaitu gelombang dan pasang surut air laut. Perubahan garis pantai dapat terjadi dari waktu ke waktu dalam skala musiman maupun tahunan, tergantung pada daya tahan kondisi pantai dalam bentuk topografi, batuan dan sifat-sifatnya dengan gelombang laut, pasang surut (pasut), dan angin (Opa, 2011). Proses perubahan pantai merupakan proses yang dinamis, jika proses ini berlangsung secara terus menerus akan mengganggu aktivitas yang ada di sekitar wilayah pantai karena akan menyebabkan terjadinya proses erosi dan atau sedimentasi pada wilayah tersebut. (Tarigan, Simarmata, Nurisman, & Rahman, 2020). Garis pantai akan berubah dengan adanya proses abrasi maupun proses akresi. Abrasi merupakan proses terjadinya pengurangan daratan sehingga garis pantai akan mundur ke arah daratan. Sedangkan proses akresi merupakan proses terjadinya penambahan daratan sehingga garis pantai akan maju ke arah lautan (Haryani, 2015).

Kabupaten Indramayu terletak di wilayah utara Jawa Barat. Kabupaten tersebut dialiri oleh Sungai Cimanuk yang bercabang membentuk Sungai Rambutan dan Sungai Anyar yang bermuara di wilayah pesisir barat; sedangkan muara Sungai Cimanuk terdapat di pesisir timur Indramayu. Muara Sungai Cimanuk membentuk delta sungai yang dari tahun ke tahun terus mengalami penambahan luas. Setiap tahun Sungai

Cimanuk mengangkut sedimen yang cukup banyak ke muara, sehingga fenomena akresi terus terjadi di wilayah ini dari tahun ke tahun. Hal ini sesuai dengan tulisan Astjario dan Astawa (2016) yang menyatakan bahwa Delta Cimanuk merupakan salah satu pesisir yang terus mengalami akresi di utara Pulau Jawa.

Pertumbuhan delta yang terus meningkat diikuti oleh peningkatan luasan *mangrove*. Sejak tahun 1991 *mangrove* di Delta Cimanuk terus mengalami penambahan seiring dengan bertambahnya luasan delta. Sebagaimana ekosistem *mangrove* pada umumnya, ekosistem *mangrove* di Delta Cimanuk berperan penting bagi kehidupan, diantaranya sebagai tempat memijah dan tinggal bagi banyak organisme pesisir seperti udang, ikan, dan kerang. Manfaat lingkungan *mangrove* lainnya adalah sebagai penyimpan cadangan karbon (Kepel, Nugraha, Jayawiguna, Sudirman, & Mangindaan, 2021). Bagi masyarakat, *mangrove* di Delta Cimanuk sejak tahun 2014-2018 dimanfaatkan sebagai wilayah pertanian. Selain itu, Delta Cimanuk juga dimanfaatkan pada sektor perikanan, pariwisata, dan pembangunan infrastruktur lainnya (Pamungkas dan Saraswati, (2020); Nur, Hendrizan, Nurhidayati, & Ismayanto, (2020)). Sodikin, Kusnanto, Afrianto, & Nurkholifah, (2021) mengidentifikasi, sebanyak 77% *mangrove* dimanfaatkan untuk perluasan lahan tambak, 22% ditumbuhi *mangrove* secara alami, dan 1% lainnya untuk peruntukan lain.

Berbagai pemanfaatan masyarakat tersebut memberikan tekanan terhadap *mangrove* Delta Cimanuk. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui hubungan penambahan daratan (delta) dengan penambahan luasan *mangrove* di Muara Sungai Cimanuk Kabupaten Indramayu, Provinsi Jawa Barat

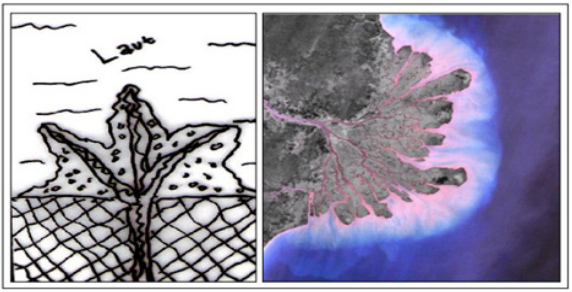
TINJAUAN PUSTAKA

1. Delta

Delta merupakan endapan sedimen yang terbentuk dari proses sedimentasi fluvial yang memasuki tenangnya badan air (Boggs, 2006). Endapan tersebut membentuk daratan delta pada garis pantai. Aktivitas sungai mendominasi pada bagian atas daratan delta, sedangkan aktivitas laut seperti penggenangan

tidak mendominasi bagian bawah daratan delta. Ada 5 macam bentuk delta menurut Hartoko dan Anindya (2010), meliputi:

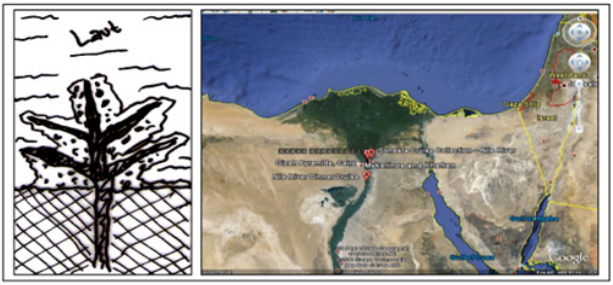
a. Delta *Lobben*. Delta *lobben* berbentuk mirip seperti kaki burung. Sungai yang mengalir ke delta ini mengangkut banyak endapan sehingga dapat tumbuh dengan cepat (Gambar 1). Contoh delta bentuk *lobben* adalah Delta Mahakam di Kalimantan Timur dan Delta Missisippi. Delta bentuk *lobben* di Delta Mahakam terbentuk karena tingginya muatan sedimen serta kuatnya dorongan massa air Sungai Mahakam ke Delta Mahakam, sehingga delta ini memiliki karakter *'fresh-water dominated delta ecosystem'*. Lemahnya masa air laut menyebabkan bentuk Delta Mahakam berkembang ke semua arah. Dengan demikian, bentuk delta akan mengikuti arah gelombang dan arus laut pada suatu perairan.



Sumber : Hartoko dan Anindya, (2010)

Gambar 1. Bentuk Delta Kaki Burung (*lobben*) dan Delta Mahakam

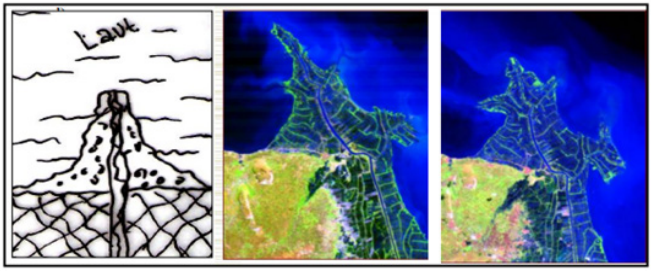
b. Delta Tumpul. Delta berbentuk tumpul menyerupai busur. Kuatnya energi gelombang yang datang dengan arah tegak lurus ke arah pantai dan kuat berpengaruh terhadap bentuk tersebut. Hal ini menyebabkan distribusi material sungai merata ke arah kanan dan kiri muara. Muara jenis ini cenderung memiliki luasan tidak bertambah besar atau tetap. Contoh delta sungai yang memiliki bentuk tumpul adalah Delta Sungai Nil dan Delta Tiger (Gambar 2).



Sumber: Hartoko dan Anindya, (2010)

Gambar 2. Bentuk Delta Tumpul

c. Delta Runcing (*Cuspate*). Delta runcing berbentuk menyerupai kerucut. Semakin jauh dari daratan, delta semakin mengerucut (sempit). Delta ini terbentuk karena energi massa sungai semakin ke arah laut semakin lemah yang disebabkan oleh dasar pantai yang landai. Contoh delta sungai yang memiliki bentuk runcing adalah Delta Sungai Sidoarjo, Provinsi Jawa Timur (Gambar 3).

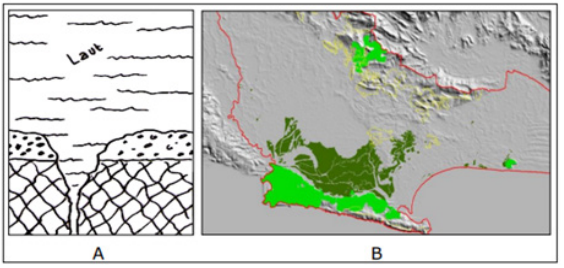


Sumber : Hartoko dan Anindya, (2010)

Gambar 3. Bentuk Delta Runcing

d. Estuaria. Estuaria terbentuk di mulut sungai. Biasanya merupakan bagian yang luas dan rendah. Menurut Supriadi (2001), daerah estuaria merupakan daerah pesisir

semi tertutup. Wilayah ini meliputi delta-delta besar dan muara sungai. Pergerakan massa air tawar dan air laut pada wilayah estuari menyebabkan terjadinya stratifikasi estuari, diantaranya: stratifikasi estuaria baji garam atau sempurna (*salt wedge estuary*), terbentuk pada estuari yang memiliki pasang surut yang lebih rendah daripada aliran sungai yang sehingga sirkulasi estuaria lebih didominasi oleh aliran sungai; Stratifikasi parsial atau sebagian (*moderately stratified estuary*), terbentuk pada estuari yang arus pasang surut lebih dominan daripada aliran sungai, sehingga percampuran antara sebagian lapisan massa air terjadi; Estuaria homogen vertikal atau Campuran sempurna (*well-mixed estuaries*), terbentuk pada estuari yang memiliki arus pasang surut besar, dengan aliran sungai yang kecil sehingga terjadi percampuran yang baik dari bawah sampai atas. Contoh estuaria adalah Laguna Segara Anakan, Provinsi Jawa Tengah (Gambar 4).



Sumber: Hartoko dan Anindya, (2010)

Gambar 4. Bentuk Delta Estuaria

e. Delta Berbelok**.** Delta berbelok terbentuk pada muara sungai di pantai laut samudera dalam. Tekanan arus laut yang sangat besar menyebabkan air sungai tertahan, sehingga tidak dapat mengalir ke laut dalam. Contoh delta yang berbelok misalnya Delta Pantai Ayah Kebumen yang ada di Pantai Selatan Jawa.

2. Pengertian *Mangrove*

Kata *'mangrove'* pertama kali digunakan untuk mendefinisikan tumbuhan dan komunitas, serta untuk menggambarkan komponen tumbuhan penyusun komunitas hutan rapat di daerah intertidal perairan pantai tropis (*tropical intertidal closed-forest community*).

Hutan *mangrove* (*mangrove forest*) juga dikenal sebagai hutan bakau, hutan pasang surut, hutan pantai, atau hutan payau (Dahuri, 2001). Mangrove banyak dijumpai di daerah datar dengan pasang surut dengan air yang tenang, serta terjadi pelumpuran dan pengendapan substrat. Sebaliknya, *mangrove* jarang dijumpai pada wilayah yang berombak besar dan terjal (Nontji, 1987). *Mangrove* tumbuh dengan baik pada daerah *supratidal* dan *intertidal* di daerah subtropis dan tropis yang dialiri oleh air tawar. *Mangrove* sangat sensitif terhadap dingin, sehingga memiliki persebaran yang luas di sekitar garis lintang di Indonesia, diantaranya di pantai Pulau Kalimantan, Pantai Timur Sumatra, Pantai Utara Jawa, serta di Pantai Irian Jaya.

Di pesisir pantai Indonesia, tumbuhan ini ditemukan tumbuh membentuk hutan pantai yang luas di wilayah-wilayah pantai dengan formasi berupa teluk (contoh, Teluk Tomini di Pulau Sulawesi), delta-delta di muara sungai besar (contoh, Delta Mahakam di wilayah pantai Timur Pulau Kalimantan), pantai-pantai yang landai (contoh, pesisir pantai Timur Pulau Sumatera), dan laguna (contoh, Laguna Segara Anakan di Cilacap). Di wilayah pesisir pantai lainnya baik di daratan pulau besar maupun gugusan pulau-pulau kecil, tumbuhan ini dapat ditemukan secara sporadis dalam komunitas-komunitas yang relatif kecil (Djamalluddin, 2018).

Ekosistem *mangrove* berperan penting bagi wilayah pesisir. Ekosistem ini bernilai ekonomi serta dapat mendukung ekosistem lain seperti terumbu karang, padang lamun, dan perikanan pantai (Siburian, 2016). Akar penangkap tumbuhan *mangrove* dapat menangkap sedimen yang terbawa baik oleh air sungai maupun air laut, sehingga mencegah terjadinya abrasi serta menstabilkan lahan yang labil seperti pada delta sungai (Juhadi & Santoso, 2020).

Menurut Santoso (2005) Flora *mangrove* umumnya di lapangan tumbuh membentuk zonasi mulai dari pinggir pantai sampai pedalaman daratan. Zonasi di hutan *mangrove*

mencerminkan tanggapan ekofisiologis tumbuhan *mangrove* terhadap gradasi lingkungan. Zonasi yang terbentuk bisa berupa zonasi yang sederhana (satu zonasi, zonasi campuran) dan zonasi yang kompleks (beberapa zonasi) tergantung pada kondisi lingkungan *mangrove* yang bersangkutan. Beberapa faktor lingkungan yang penting dalam mengontrol zonasi adalah:

a. Pasang surut yang secara tidak langsung mengontrol dalamnya muka air (*water table*) dan salinitas air dan tanah. Secara langsung arus pasang surut dapat menyebabkan kerusakan terhadap anakan
b. Tipe tanah yang secara tidak langsung menentukan tingkat aerasi tanah, tingginya muka air dan drainase.
c. Kadar garam tanah dan air yang berkaitan dengan toleransi spesies terhadap kadar garam.
d. Cahaya yang berpengaruh terhadap pertumbuhan anakan dari spesies intoleran seperti *Rhizophora*, Avicennia, dan Sonneratia.
e. Pasokan dan aliran air tawar.

Penelitian tentang zonasi *mangrove* telah dilakukan oleh Rahman, Yanuarita, & Nurdin (2015) hasil penelitiannya menggambarkan bahwa zonasi *mangrove* di Kabupaten Muna ditentukan oleh perbedaan substratnya, semakin berpasir maka akan didominasi oleh genus *Sonneratia* sp dan semakin berlumpur maka akan didominasi oleh *Rhizhophora* sp dan *Bruguera* sp.

Mangrove memiliki banyak fungsi. Menurut Kustanti (2011) hutan *mangrove* memiliki tiga fungsi, yaitu fungsi sosial-ekonomi, fungsi fisik, dan fungsi biologi/ekologis.

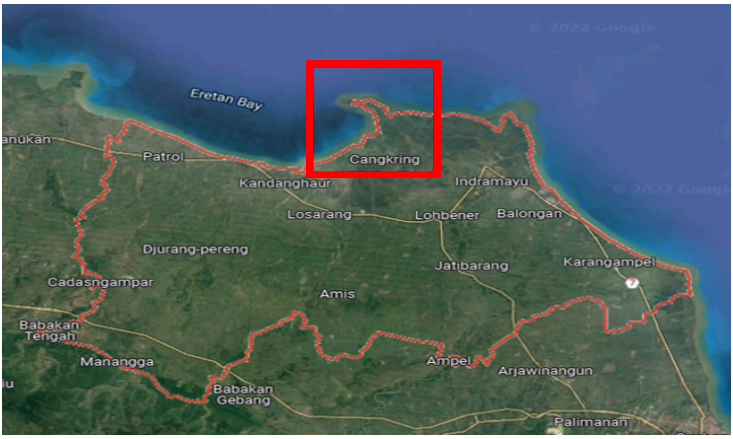
a. Fungsi Sosial dan Ekonomi. Pemanfaatan *mangrove* melalui pengelolaan hutan *mangrove* secara lestari dapat meningkatkan sosial dan ekonomi masyarakat. Pengelolaan hutan tersebut hendaknya tetap berkiblat pada inisiatif masyarakat lokal yang tinggal di sekitar hutan. Tujuannya adalah agar masyarakat merasa dilibatkan sehingga turut berperan dalam perlindungan hutan *mangrove.* Pelibatan ini hendaknya tetap dibarengi dengan pendampingan agar pemanfaatan tidak menjadi eksploitasi yang berlebih sehingga mengancam kelestarian hutan *mangrove.*

b. Fungsi Fisik. Hutan *mangrove* memiliki banyak fungsi fisik, diantaranya: 1) memberikan perlindungan dan menjaga kestabilan tebing sungai dan garis pantai dari erosi/ abrasi. 2) akarnya dapat menangkap sedimen sehingga memperluas lahan (akresi) dengan cepat. 3) perakaran *mangrove* dapat mencegah terjadinya intrusi air laut ke daratan. 4) formasi hutan *mangrove* dapat meredam gelombang dan angin kencang sehingga melindungi penduduk dari gelombang pasang dan badai, dan 5) akar-akarnya mampu menetralisir limbah organik dan bahan beracun, sehingga tidak langsung dilepaskan ke laut/pantai (Kusmana *et al*., 2003).

c. Fungsi Biologis/Ekologis. Sebagai ekosistem, hutan *mangrove* terdiri dari komponen abiotik, seperti salinitas laut, pasang surut air laut, ombak laut, lumpur berpasir, pantai yang landai, dan lain sebagainya, serta komponen biotik seperti semak, pepohonan, dan fauna. Hutan *mangrove* juga berperan sebagai penyedia makanan dan tempat tinggal berbagai organisme seperti burung, udang, ikan, kepiting, dan mamalia. Akar hutan *mangrove* memungkinkan sebagai tempat perlindungan bagi organisme di dalamnya, selain itu juga dapat digunakan sebagai tempat yang ideal dan sangat baik untuk pemijahan *(spawning ground)* bagi berbagai biota yang ada di dalamnya.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di Delta Sungai Cimanuk, Kabupaten Indramayu, Provinsi Jawa Barat. Hulu Sungai Cimanuk terdapat di Kabupaten Garut dan bermuara di Kabupaten Indramayu. Secara astronomis Delta Sungai Cimanuk terletak pada 6°14'20.5"S - 108°12'26.8"E. Peta Lokasi Penelitian disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Lokasi Penelitian

Penelitian menggunakan Teknik Sistem Informasi Geogafis (SIG) dan penginderaan jauh, bahan yang digunakan antara lain Citra Landsat untuk pemantauan garis pantai menggunakan citra perekaman tahun 1991, 1996, 2011, dan 2021, untuk pemantauan *mangrove* digunakan citra landsat tahun 1995, 2001, 2011, dan 2021. Penggunaan citra perekaman yang berbeda antara citra untuk pemantauan garis pantai *mangrove* diasumsikan bahwa pertumbuhan *mangrove* akan optimal setelah minimal 5 tahun. Teknik pengumpulan data dilakukan dengan ekstraksi citra landsat untuk memperoleh penggunaan lahan yang berada di wilayah penelitian, khususnya tutupan lahan *mangrove* dan garis pantai. Teknik analisis dilakukan dengan *overlay* untuk mengetahui perubahan-perubahan *mangrove* dan garis pantai. Analisis ini dibantu dengan menggunakan *Google Earth Engine*. Analisis pengaruh kedua variabel dilakukan dengan menggunakan *korelasi pearson* yang digunakan untuk melihat tingkat hubungan antara variabel bebas (Penambahan daratan/ delta) dan variabel terikat (penambahan luasan *mangrove*) dengan menggunakan formulasi sebagai berikut:

$$r = \frac{N\sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{\left\{N\sum XY^2 - \left(\sum X\right)^2\right\}\left\{N\sum Y^2 - \left(\sum Y\right)^2\right\}}}$$

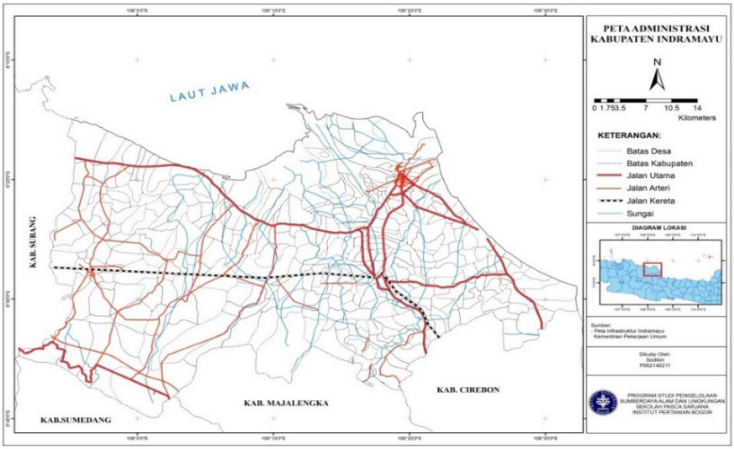
Keterangan
r = Koefisien korelasi; N = Jumlah data; X = Skor variabel X (bebas); Y = Skor vaiabel Y (terkait)
Interpretasi koefisien korelasi adalah sebagai berikut.
0,000 - 0,199 = Sangat Lemah
0,600 - 0,799 = Kuat
0,200 - 0,399 = Lemah/rendah
0,800 - 1,000 = Sangat kuat
0,400 - 0,599 = Cukup

PEMBAHASAN

1. Deskripsi Wilayah Penelitian

Kabupaten Indramayu membentang pada 107^0 52′ - 108^0 36′ Bujur Timur dan 6^0 15′ - 6^0 40′ Lintang Selatan. Luas Kabupaten Indramayu adalah 209.942 Ha dengan garis pantai memiliki panjang 114.1 km dan membentang sepanjang pantai utara dari Kabupaten Subang sampai Kabupaten Cirebon.

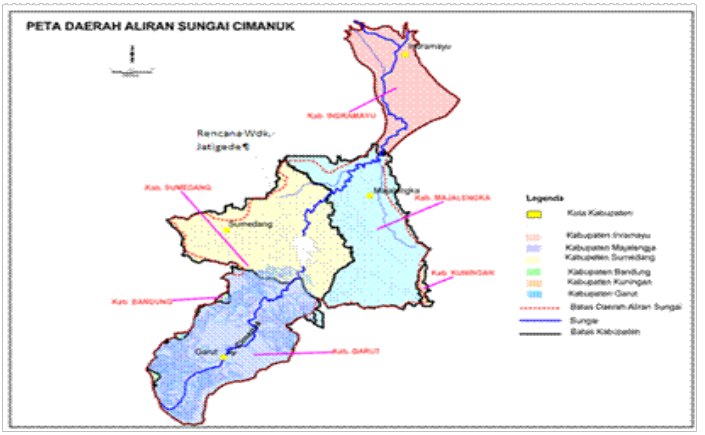
Secara administratif, Kabupaten Indramayu terdiri dari 31 kecamatan, 8 kelurahan, dan 310 desa. Wilayah Indramayu berbatasan langsung dengan laut. Setidaknya terdapat 37 desa dari 11 kecamatan di Kabupaten Indramayu yang berbatasan dengan laut. Peta administrasi lokasi penelitian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Peta Administrasi Kabupaten Indramayu

Sungai Cimanuk merupakan sungai lintas kabupaten yang melewati empat kabupaten antara lain, Kabupaten Garut, Kabupaten Sumedang, Kabupaten Majalengka, dan Kabupaten Indramayu. Sungai Cimanuk bermuara di Laut Jawa tepatnya di wilayah Desa Lamaran, Tarung Kecamatan Cantigi, Kabupaten Indramayu, Provinsi Jawa Barat. Luas DAS Cimanuk kurang lebih 3.493 km^2 yang dibagi menjadi tiga segmen, yaitu seluas 145,677 Ha merupakan segmen Cimanuk hulu yang meliputi di Kabupaten Garut dan Sumedang, dengan mata air berasal dari Situ Cipanas. Seluas 114,477 Ha merupakan Segmen Cimanuk Tengah. Segmen ini berada di Kabupaten Majalengka dan Kabupaten Sumedang. Seluas 81,299 Ha diantaranya merupakan segmen Cimanuk Hilir yang termasuk dalam wilayah Kabupaten Indramayu (Dinas Lingkungan hidup Kabupaten Indramayu Tahun 2018). Segmen hilir Sungai Cimanuk yang berada di Kabupaten Indramayu melintasi Kecamatan Tukdana, Kecamatan Bangodua, Kecamatan Sukagumiwang, Kecamatan Kertasemaya, Kecamatan Jatibarang, Kecamatan Widasari, Kecamatan Lohbener, Kecamatan Arahan, Kecamatan Sindang, Kecamatan Indramayu, dan Kecamatan Cantigi. Delta Cimanuk atau Muara Sungai Cimanuk berada di Desa Lamaran Tarung,

Kecamatan Cantigi. Secara astronomis Delta Cimanuk terletak pada 6°14'20.5"S 108°12'26.8"E. Gambar 7 merupakan spasial DAS Cimanuk.

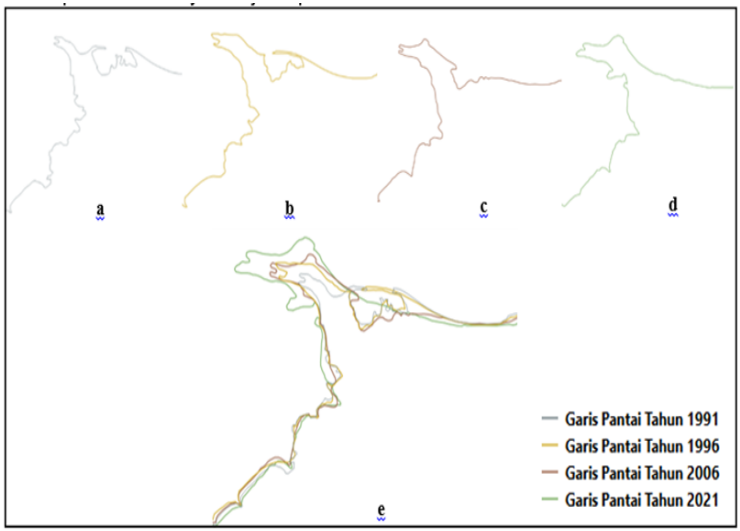


Sumber : http://tatanggustawan.blogspot.com/2009/11/laporan-hasil-perjalanan-daytrip.html

Gambar 7. Peta Daerah Aliran Sungai (DAS) Cimanuk

2. Penambahan daratan di Delta Sungai Cimanuk Kabupaten Indramayu Tahun 1991-2015.

Berdasarkan hasil ekstraksi citra landsat dengan menggunakan *Google Earth Engine* diperoleh informasi spasial perubahan garis pantai di delta Muara Sungai Cimanuk, secara spasial penambahan daratan di delta Cimanuk Kabupaten Indramayu disajikan pada Gambar 8.



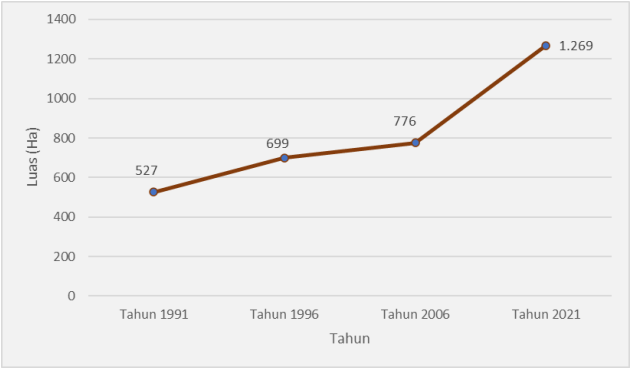
Gambar 8. Perubahan Garis Pantai (a) Tahun 1991 (b) Tahun 1996 (c) Tahun 2006 (d) Tahun 2021 dan (e) *Overlay* Garis Pantai Tahun 1991,1996, 2006 dan 2021.

Gambar 8 memperlihatkan pertumbuhan Delta Cimanuk sejak tahun 1991 sampai saat ini. Kondisi tersebut sangat mungkin akan terus bertambah. Delta Cimanuk terbentuk memanjang dan meruncing ke arah barat laut, dan termasuk ke dalam kategori delta runcing (*cuspate*). Delta runcing berbentuk menyerupai kerucut. Semakin jauh dari daratan, delta semakin mengerucut (sempit). Delta ini terbentuk karena energi massa sungai semakin ke arah laut semakin lemah yang disebabkan oleh dasar pantai yang landai (Hartoko & Anindya, 2010). Shi et al., (2016) menjelaskan bahwa konsentrasi sedimen tersuspensi pada lumpur pasang surut berpengaruh terhadap lingkungan ekologis dan evolusi morfologi pantai. Evolusi morfologi pada Sungai Cimanuk adalah terjadinya delta yang membentuk kerucut

Kondisi wilayah Delta Cimanuk berbeda dengan wilayah pantai lainnya di Kabupaten Indramayu. Sebagian besar wilayah pesisir Kabupaten Indramayu saat ini terjadi abrasi baik dengan kategori rendah, sedang, maupun tinggi. Namun wilayah Delta

Cimanuk memiliki kondisi wilayah yang cenderung berbeda, yaitu terjadi penambahan daratan (akresi) dan membentuk delta sungai. Hal ini senada dengan hasil penelitian Kusnanto (2022) terdapat tiga kecamatan yang mengalami akresi tinggi antara lain Kecamatan Cantigi 177 ha, Kecamatan Pasekan 62 ha, dan Kecamatan Indramayu 38 ha.

Delta Cimanuk terbentuk karena banyaknya sedimen yang diangkut Sungai Cimanuk ke bagian hilir. Hal ini diperkuat oleh pernyataan Setyawan (2017) yang menyatakan bahwa Delta Sungai Cimanuk terbentuk akibat sedimentasi yang terbawa dari kawasan hulu. Selain itu proses sedimentasi pada Delta Cimanuk juga disebabkan oleh banyak dan cepatnya proses pelumpuran menjadi penyebab dinamisnya morfologi Delta Cimanuk (Sukardjo, 1986). Lebih rinci luasan Delta Cimanuk dari tahun 1991 sampai dengan tahun 2021 seperti di sajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Luasan Delta Cimanuk Tahun 1991-2021

Gambar 9 menunjukkan bahwa pada tahun 1991 luas Delta Cimanuk mencapai 527 Ha. Pada tahun 1996 terjadi peningkatan luas menjadi 699 Ha. Tahun 2006 luasan Delta Cimanuk meningkat menjadi 776 Ha dan pada tahun 2021 Delta Cimanuk mengalami peningkatan yang cukup signifikan dibandingkan tahun-tahun sebelumnya, yaitu mengalami pertumbuhan menjadi 1266 Ha. Sehingga dapat kita simpulkan kenaikan delta

Cimanuk selama 30 tahun adalah sebesar 742 Ha dan kenaikan tertinggi adalah pada rentang tahun 2006 sampai dengan 2021 yaitu sebesar 493 ha.

Delta sungai yang terbentuk tersebut sejak tahun 2014-2018 dimanfaatkan sebagai wilayah pertanian. Selain itu, Delta Cimanuk juga dimanfaatkan pada sektor perikanan, pariwisata, dan pembangunan infrastruktur lainnya (Pamungkas & Saraswati, 2020); Nur, Hendrizan, Nurhidayati, & Ismayanto, (2020)). Sodikin, Kusnanto, Afrianto, & Nurkholifah, (2021) mengidentifikasi, sebanyak 77% *mangrove* dimanfaatkan untuk perluasan lahan tambak, 22% ditumbuhi *mangrove* secara alami, dan 1% lainnya untuk peruntukan lain.

3. Luasan Mangrove di Kawasan Delta Cimanuk Tahun 1995-2021

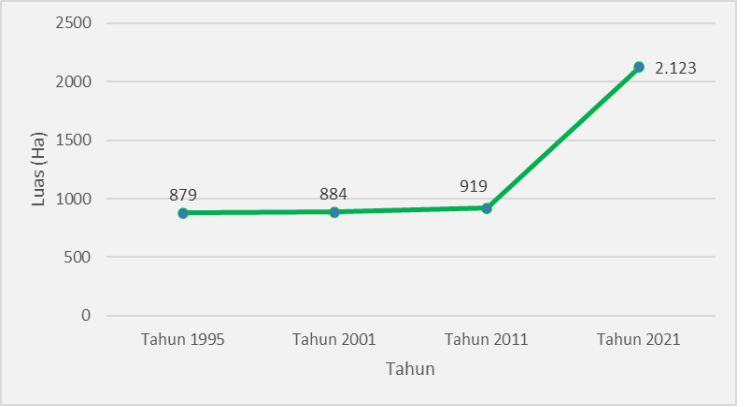
Berdasarkan hasil observasi lapangan yang dilakukan pada tahun 2021 *mangrove* di Delta Cimanuk menempati pinggiran pantai sampai masuk pada tepi Sungai Cimanuk itu sendiri. Hasil observasi menemukan 9 jenis *mangrove* baik *mangrove* mayor maupun *mangrove* ikutan. Jenis *mangrove* yang ditemukan pada lokasi penelitian lebih detail ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis *Mangrove* di Delta Cimanuk Kabupaten Indramayu

Nama Latin	Nama Lokal
Rhizophora mucronata	Bakau
Rhizophora stylosa	Bakau
Rhizophora apiculata	Bakau
Agiceras corniculatum	Gedangan
Avicennia marina	Api-api
Avicennia alba	Api-api
Sonneratia caseolaris	Pedada
Sonneratia alba	Pedada
Acanthus ilicifolius	Jeruju

Berdasarkan Tabel 1 terdapat 9 jenis *mangrove* yang tersebar di wilayah Delta Cimanuk. Wilayah ini didominasi oleh jenis *Avicennia* dan *Rhizophora. Mangrove* di wilayah pesisir Indramayu mayoritas pada kondisi yang semakin menurun. Berdasarkan hasil penelitian Sodikin, Sitorus, Prasetyo, & Kusmana (2018), *mangrove* di Kabupaten Indramayu pada rentang waktu tahun 1989 sampai tahun 2015 terus mengalami penurunan. Penyebab utamanya adalah konversi lahan *mangrove* yang digunakan untuk peruntukan lain. Sebagian besar diantaranya untuk perluasan tambak.

Seiring meningkatnya luasan Delta Cimanuk, luasan *mangrove* di wilayah ini juga mengalami peningkatan. Berdasarkan hasil pantauan citra landsat terlihat bahwa penambahan luasan *mangrove* di wilayah Delta Cimanuk sejalan dengan meningkatnya luasan delta yang terbentuk. Lebih detail peningkatan luasan *mangrove* di wilayah Delta Cimanuk disajikan pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik Penambahan Luasan *Mangrove* Tahun 1995-2021

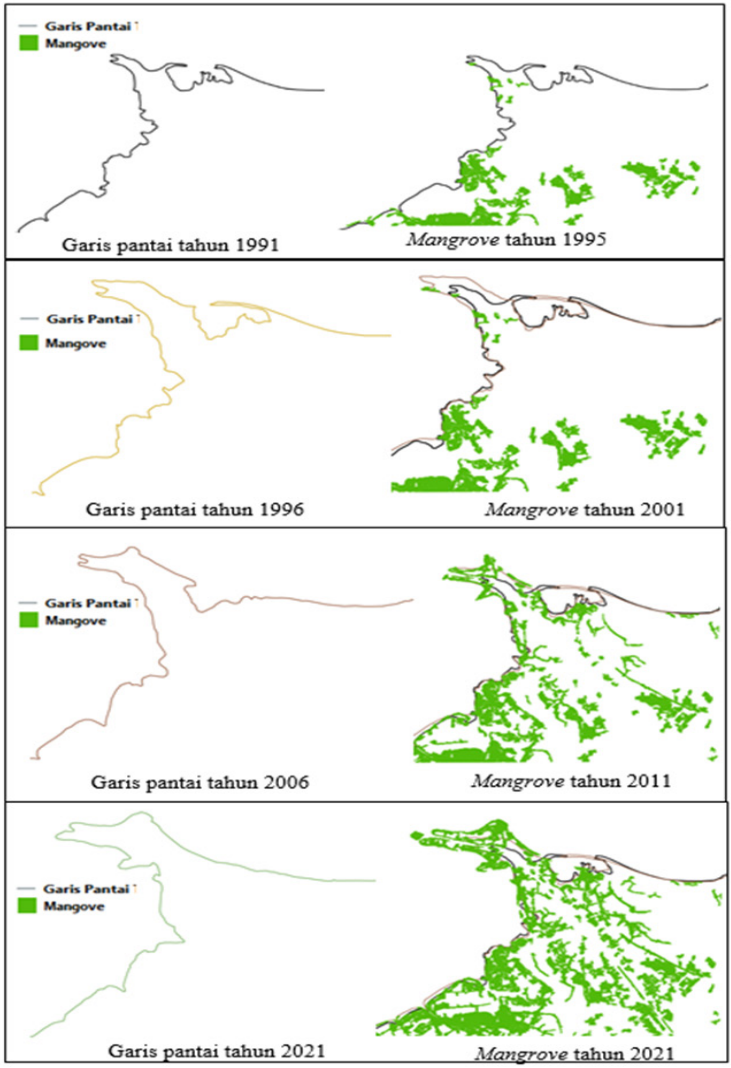
Berdasarkan Gambar 10 terlihat bahwa dari tahun 1995 luasan *mangrove* di Delta Cimanuk sebesar 879 ha, kemudian pada tahun 2001 luasan *mangrove* mengalami peningkatan menjadi 884 ha. Pada tahun 2011 luasan *mangrove* meningkat menjadi 919 ha dan pada tahun 2011 *Mangrove* mengalami

peningkatan kembali meniadi 2.123 ha, peningkatan luasan *mangrove* tertinggi terjadi pada rentang tahun 2011 sampai dengan 2021. Pada rentang tahun tersebut *mangrove* mengalami peningkatan sebesar 1.204 ha.

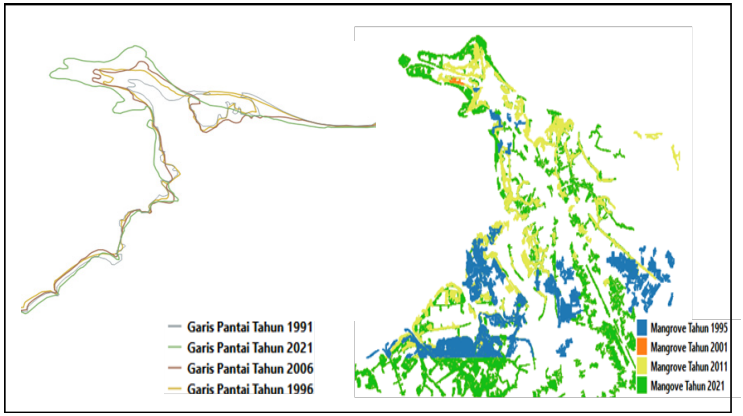
Penambahan *mangrove* di Delta Cimanuk terjadi secara alami maupun oleh program-program rehabilitasi yang dilakukan oleh pemerintah, LSM, CSR perusahaan, maupun masyarakat sekitar yang memanfaatkan lahan yang baru timbul untuk dilakukan penanaman *mangrove*. Di wilayah ini, *mangrove* umumnya tumbuh dengan optimal karena *mangrove* sangat sesuai dengan syarat pertumbuhannya, yaitu terletak pada daerah subtidal dan intertidal dialiri oleh aliran air tawar. Lokasi tersebut juga dan terlindung dari arus pasang surut yang kuat dan gelombang besar, serta Delta Cimanuk termasuk daerah pantai yang terlindung (Keninish, 1990).

4. Hubungan Penambahan daratan dengan perubahan *Mangrove* di Muara Sungai Cimanuk

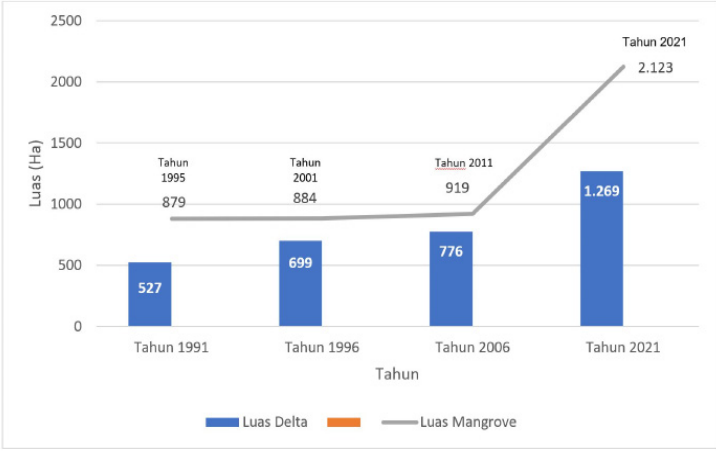
Berdasarkan hasil analisis terlihat bahwa penambahan luasan daratan selalu diikuti oleh penambahan/peningkatan luasan *mangrove.* Hal ini senada dengan pernyataan dari Kathiresan dan Bingnam (2001) dan Setyawan (2008) yang menyatakan bahwa akar *mangrove* dapat menyaring dan menangkap bahan pencemar, menyimpan sekuestrasi karbon, menjaga kealamian habitat, melindungi dan menstabilkan garis pantai, menjadi tempat bersarang, membentuk daratan baru mendukung perikanan pesisir, serta tempat memijah dan membesarkan anak berbagai jenis ikan, udang, kerang, burung, dan fauna lain. *Trend* penambahan daratan dan luasan *mangrove* di Delta Sungai Cimanuk seperti disajikan pada Gambar 11 a dan 11b.



Gambar 11a. *Trend* Spasial Penambahan daratan dan *mangrove* di Delta Cimanuk pada periode tahun 1991, 1996, 2006, dan 2021



Gambar 11b. *Trend* Spasial Penambahan Daratan dan *Mangrove* di Delta Cimanuk



Gambar 12. Penambahan Daratan dan *Mangrove* di Muara Sungai Cimanuk Kabupaten Indramayu Rentang Tahun 1991-2021

Berdasarkan Gambar 11 dan 12 terlihat bahwa pada tahun 1991 luasan Delta Sungai Cimanuk adalah 527 ha, dan luasan *mangrove* tahun 1995 adalah 879 ha, pada tahun 1996 luasan delta mengalami peningkatan menjadi 699 ha, hal ini diikuti oleh peningkatan *mangrove* menjadi 884 ha pada tahun 2001, pada tahun 2006 Delta Cimanuk meningkat kembali menjadi 776 ha yang dikuti oleh peningkatan luasan *mangrove* menjadi 919 ha, kemudian pada tahun 2021 baik delta maupun luasan *mangrove* mengalami peningkatan yang signifikan yaitu luas delta menjadi 1.269 ha dan luasan *mangrove* menjadi 2.123 ha.

Berdasarkan hasil analisis regresi linier sederhana dari data *time series* penambahan daratan dan penambahan *mangrove* di muara Sungai Cimanuk terlihat bahwa hasil analisis korelasi menunjukkan nilai koefisien (r) antara penambahan daratan dan perubahan *mangrove* di Delta Sungai Cimanuk bernilai positif yaitu 0,746 dimana hal ini memperlihatkan tingkat hubungan yang kuat antara kedua variabel tersebut, yaitu memiliki signifikansi pada taraf 5%. Nilai koefisien determinasi 0,619 atau 61,9% yang artinya bahwa variabel x (penambahan daratan) dapat menjelaskan variabel y (perubahan *mangrove*) sebesar 61,9% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain. Pola hubungan antara penambahan daratan dengan peningkatan *mangrove* di Delta Cimanuk berdasarkan hasil observasi lapangan terlihat bahwa *mangrove* muncul setelah adanya penambahan daratan, pada mulanya daratan masih sangat tidak stabil (masih berbentuk lumpur) yang terkena pasang surut yang kadang muncul dan kadang tenggelam. Setelah itu akan ditumbuhi *mangrove* secara alami biasanya ditumbuhi oleh jenis *Avicennia*, kemudian pertumbuhan *mangrove* yang pesat akan memperkuat struktur tanah di sana sehingga menjadi daratan yang masif. Hal ini menunjukkan bahwa fungsi *mangrove* di Delta Cimanuk memilik fungsi menangkap sediman sehingga dari tumpukan sedimen tersebut akan memperluas lahan (akresi) dengan cepat (Kusmana et al., 2003). Setelah menjadi daratan yang masif dengan vegetasi *mangrove* yang rapat, tidak jarang masyarakat menkonversi lahan *mangrove* tersebut menjadi lahan tambak untuk budidaya perikanan. Selain itu masyarakat nelayan memandang bahwa sedimentasi dan *mangrove* yang ada dianggap sebagai penghalang jalur perahu mereka. Hal ini senada dengan pernyataan Darmiati

(2020) Majunya garis pantai biasanya berdampak positif karena pantai mengalami penambahan wilayah, tetapi untuk daerah pantai yang dipengaruhi oleh muara sungai akan terganggu karena terjadi pendangkalan yang menyebabkan terganggunya alur transportasi sungai. Apabila ini tidak dikendalikan maka akan menyebabkan ketidakseimbangan ekosistem di kawasan Delta Sungai Cimanuk. Terjadinya degradasi lingkungan dan kerusakan ekosistem *mangrove* secara masif akan memicu terjadinya bencana ekologi seperti abrasi, intrusi air laut dan banjir rob (Maulani 2021).

KESIMPULAN

Delta Sungai Cimanuk mengalami perubahan garis pantai berupa penambahan daratan (akresi) yang terjadi karena banyaknya sedimen yang diangkut oleh Sungai Cimanuk dari hulu menuju ke hilir, sehingga membentuk delta yang semakin luas dan memajang berbentuk runcing (*cuspate*) ke arah barat laut. Penambahan daratan pada Delta Sungai Cimanuk bersamaan dengan peningkatan luasan *mangrove* di wilayah tersebut. Pola pertumbuhan luasan *mangrove* mengikuti pertumbuhan daratan itu sendiri. Wilayah Delta Cimanuk didominasi oleh *mangrove* jenis *Avicennia marina* dan *Rhizophora apiculata*. Hasil analisis korelasi menunjukkan nilai koefisien (r) antara penambahan daratan dan perubahan *mangrove* di Delta Cimanuk bernilai positif yaitu 0,746 dimana hal ini menunjukkan bahwa kedua variabel tersebut memiliki tingkat hubungan yang kuat serta signifikansi pada taraf 5%.

DAFTAR PUSTAKA

Arifin, H. S. (2021). 7.8 Pengembangan Kota Pantai (Water Front City). *Pengembangan Perikanan, Kelautan, dan Maritim untuk Kesejahteraan Rakyat Volume II*, 719.

Astjario, P., & Astawa, N. (2016). Proses Pertumbuhan Delta Baru Sungai Cimanuk Hingga Tahun 2002, Di Pantai Timur Kabupaten Indramayu, Jawa Barat. *Jurnal Geologi Kelautan*,5(3).

Boggs Jr, S. (2006). *Principal of Sedimentology and Stratigraphy, 4th edition*. USA: Pearson Prentice Hall.

Dahuri R. (2001). *Keanekaragaman Hayati Laut Aset Pembangunan Berkelanjutan Indonesia.* Jakarta (ID): PT Gramedia Pustaka Utama.

Darmiati, Nurjaya IW , Atmadipoera AS. 2020. Analisis Perubahan Garis Pantai di Wilayah Pantai Barat Kabupaten Tanah laut Kalimantan Selatan. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis,* 12 (1), 211-222.

Djamaluddin R. (2018). Mangrove Biologi, Ekologi, Rehabilitasi, dan Konservasi. UNSRAT Press.

Haryani, S. N. (2015). Analisis Lingkungan Pantai Berdasarkan Perubahan Garis Pantai Dari Citra Landsat Multi Temporal. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan XX 2015* halaman 583-590.

Hartoko, A., & Anindya, W. (2010). *Oseanografi dan Sumber Daya Perikanan Kelautan di Indonesia*. Semarang: Badan Penerbit Undip.

Juhadi, R. A. R., & Santoso, A. B. (2020). Edu-Ekowisata Hutan Mangrove Kawasan Pesisir Pasarbanggi, Rembang, Jawa Tengah, Indonesia. *Jurnal Geografi. Vol*, *9*(1).

Kathiresan, K., & Bingham, B. L. (2001). Biology of Mangroves and Mangrove Ecosystems. *Elsevier.* 40, 1– 145.

Keninish, M.J. 1990. *Ekologi of Estuaries*. Vol I: Biological Aspects. Florida: CRC Press Inc. Boca Raton.

Kepel, T. L., Nugraha, R. B. A., Jayawiguna, M. H., Sudirman, N., & Mangindaan, P. (2021). Tekanan Ekologi dan Nilai Moneter Karbon Biru Ekosistem Mangrove Muara Gembong, Teluk Jakarta. *Jurnal Kelautan Nasional*, *16*(2), 135-144.

Kusmana C, Wilarso S, Iwan H, Pamoengkas P, Wibowo C, Tiryana T, Triswanto A,

Yunasfi, Hamzah. (2003). *Teknik Rehabilitasi Mangrove*. Bogor (ID): Fahutan IPB.

Kusnanto. (2022). *Perubahan Garis Pantai dan Strategi Pengelolaan Wilayah Pesisir di Kabupaten Indramayu*. Tesis Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor (IPB).

Kustanti A. (2011). *Manajemen Hutan Mangrove*. Bogor (ID): PT Penerbit IPB Press.

Maulani A, Taufiq NSPJ, Pratikto I. 2021. Perubahan Lahan Mangrove di Pesisir Muara Gembong, Bekasi, Jawa Barat. Journal of Marine Research 10 (1): 55-63.

Nontji A. (1987). *Laut Nusantara*. Jakarta (ID): PT Djambatan.

Nur, W. H., Hendrizan, M., Nurhidayati, A. U., & Ismayanto, A. F. (2020). Estuary Changes of Cipunagara and Cimanuk River Using Landsat Imagery Spatial Analysis. *Bulletin of the Marine Geology*, *35*(2).

Opa, E.T. (2011). Perubahan garis pantai Desa Bentenan Kecamatan Pusomaen, Minahasa Tenggara. *J. Perikanan dan Kelautan Tropis*, 7(3): 109-114.

Pamungkas, F. D., & Saraswati, R. (2020). Changes in the west Delta of Ci Manuk in 2002-2018. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 561, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.

Rahman, Yanuarita D, Nurdin N. (2014). Struktur Komunitas Mangrove di Kabupaten Muna. *Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan* 24 (2):29-36.

Santoso N. (2005). *Resep Makanan Berbahan Mangrove dan Pemanfaatan Nipah*. Bandung (ID): LPP Mangrove.

Setyawan, A. D. (2008). Biodiversitas ekosistem mangrove di Jawa; tinjauan pesisir utara dan selatan Jawa Tengah. *Pusat Penelitian dan Pengembangan Bioteknologi dan Biodiversitas, LPPM. Jurusan Biologi FMIPA UNS. Surakarta*.

Setyawan FO, Sari WK, Aliviyantia D. 2021. Analisis Perubahan Garis Pantai Menggunakan Digital Shoreline Analysis System di Kecamatan Kuala Pesisir, Kabupaten Nagan Raya, Aceh. Journal of Fisheries and Marine Research 5 (2): 368-377

Setyawan, W. B. (2017). Potensi bencana geologi di kawasan Delta Cimanuk, Kabupaten Indramayu, Jawa Barat. *Seminar Nasional Kelautan* XII. XII 2: 28–38.

Siburian, R., & Haba, J. (Eds.). (2016). *Konservasi mangrove dan kesejahteraan masyarakat*. Jakarta: Yayasan Pustaka Obor Indonesia.

Shi, B., Y.P. Wang, X. Du, J.R. Cooper, P. Li, M.L. Li and Y. Yang. (2016). Field and Theoretical Investigation of Sediment Mass Fuxes on an Accretional Coastal Mudflat. *Journal of Hydro-environment Research*, 11: 75–90.

Sodikin, S., Sitorus, S. R. P., Prasetyo, L. B., & Kusmana, C. (2018). Spatial Analysis of Land Adjustment as a Rehabilitation Base of Mangrove in Indramayu Regency. In *2nd Geoplanning-International Conference on Geomatics and Planning* (pp. 1-9).

Sodikin, Kusnanto, Afrianto, L., Nurkholifah. (2021). Dinamika Spasial Pertumbuhan Delta Cimanuk Kabupaten Indramayu Provinsi Jawa Barat Tahun 2001-2020. *Prosiding Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST),* 20-28.

Sukardjo, S. (1986). Memahami Beberapa Aspek Sosial Ekonomi Hutan Mangrove di Delta Cimanuk. *Oseana*, *1*, 17-27.

Supriadi, I. H. (2001). Dinamika estuaria tropik. *Oseana*, *26*(4), 1-11.

Sutikno. (1993). *Karakteristik Bentuk dan Geologi Pantai di Indonesia Diklat PU Wilayah III*. Yogyakarta: Dirjen Pengairan Departemen Pu.

Tarigan AT, Simarmata N, Nurisman N, Rahman Y. (2020). Analisis Sedimen dan Pengaruhnya terhadap Kondisi Garis Pantai di Kawasan Pantai Timur Kabupaten Lampung Selatan. *Journal of Science and Applicative Technology.* 4 (1): 26-31.e

PEMETAAN PARAMETER FISIK KIMIA MANGROVE DENGAN PEMANFAATAN SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS DI KAWASAN PESISIR INDRAMAYU

MAPPING PHYSICAL CHEMICAL PARAMETERS OF MANGROVE WITH THE UTILIZATION OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS IN THE INDRAMAYU COASTAL AREA

Lina Warlina[1*], Agus Susanto[1], Sumartono[2], Sodikin[1]

[1]Program Studi Magister Studi Lingkungan, Jurusan Teknik, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
[2]Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Jurusan Teknik, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

*warlina@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Ekosistem mangrove merupakan suatu ekosistem yang sangat penting karena mempunyai fungsi ekologis dan ekonomis yang sangat bermanfaat bagi kehidupan, baik manusia maupun hewan lainnya. Mangrove di Kabupaten Indramayu merupakan kawasan terluas di Provinsi Jawa Barat. Di kawasan pesisir Kabupaten Indramayu terdapat beberapa sumber pencemaran baik dari limbah domestik maupun industri. Oleh karena itu, perlu ada pengendalian pencemaran terhadap daerah yang tercemar secara detail yang dilakukan dengan pemetaan spasial agar penanganannya dapat dilakukan secara optimal. Keberadaan teknologi penginderaan jauh sangat membantu dalam pemetaan ini. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pemetaan parameter fisik kimia pada perairan mangrove, yaitu parameter salinitas, fosfat, klorin, nitrat dan logam berat (timbal) di pesisir Indramayu dengan menggunakan sistem informasi geografis (SIG). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksplorasi dan pengambilan data lapangan, serta penggunaan software Arcview. Hasil penelitian menunjukkan penggunaan SIG dapat menganalisis distribusi parameter fisik kimia pencemaran secara spasial pada tiap

kecamatan. Sebaran pencemar tertinggi di kawasan mangrove di Kabupaten Indramayu: salinitas tertinggi sebesar 64,00 ppt terdapat di Kecamatan Krangkeng, fosfat tertinggi sebesar 2,08 mg/100g terdapat di Desa Karangsong Kecamatan Indramayu, nitrat tertinggi sebesar 425,20 mg/l terdapat di Desa Karongsong Kecamatan Karongsong, timbal tertinggi sebesar 0,70 mg/l terdapat di Desa Tanjakan Kecamatan Kerangkeng; sedangkan khlorin tertinggi sebesar 522,52 mg/l terdapat di kawasan pemukiman di Desa Lamaran Tarung. Nilai parameter kimia di perairan mangrove di Kabupaten Indramayu, rata-rata melebihi baku mutu lingkungan yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup, sehingga kawasan perairan di Kabupaten Indramayu dapat dikatakan mulai tercemar.

Kata Kunci: *mangrove, parameter fisik kimia, SIG, spasial.*

ABSTRACT

The mangrove ecosystem is a very important ecosystem because it has ecological and economic functions that are very beneficial for the life of both humans and other animals. Mangroves in Indramayu Regency are the largest mangrove area in West Java Province. In addition, in the coastal area of Indramayu Regency there are several sources of pollution, both from domestic and industrial waste. Therefore, it is necessary to control pollution of polluted areas in detail, including by spatial mapping so that the handling can be carried out optimally. The existence of remote sensing technology is very helpful in this mapping. The purpose of this study is to analyze the mapping of the physical and chemical parameters of mangroves, namely the parameters of salinity, chlorine, phosphate, nitrate and heavy metals (lead) on the coast of Indramayu and their impact on the mangroves by using an information system. geographic (GIS). The method used in this research is exploration and retrieval of field data and the use of Arcview software. The results showed that the use of GIS can analyze the distribution of the physical and chemical parameters of pollution spatially in each sub-district of the mangrove area. The distribution of the highest pollutant in the mangrove area in Indramayu Regency: the highest salinity of 64.00 ppt is in Krangkeng District, the highest phosphate of 2.08 mg/100g is in Karangsong Village, Indramayu District, the highest nitrate is 425.20 mg/l is in the Village Karongsong, Karongsong District, the highest lead of 0.70 mg/l was found in Tanjakan Village, Kerangkeng District; while the highest chlorine at 522.52 mg/l was found in residential areas in Lamaran Tarung Village.The value of the water chemistry parameter, the average

parameter exceeds the environmental quality standard set by Ministry of Environment, so that the water area in Indramayu Regency is starting to be polluted.

Keywords: *mangrove, physical and chemical parameters, GIS, Spatial,*

PENDAHULUAN

Sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, Indonesia mempunyai 17.499 pulau besar dan kecil. Luas Indonesia mencapai 7,81 juta km^2 dengan 3,25 juta km^2 di antaranya adalah lautan dan 2,55 juta km^2 merupakan zona ekonomi eksklusif (Nurhadi, 2022). Panjang pantai kurang lebih 54.716 km yang merupakan pantai terpanjang ketiga di dunia (Karnadi, 2022). Wilayah pantai memiliki sumber daya pesisir yang sangat besar baik hayati maupun non hayati. Daerah ini merupakan peralihan antara komunitas dasar habitat laut yang lunak dan keras yang disebut *ekotone.* Komunitas *ekotone* biasanya mengandung banyak organisme. Masing-masing komunitas saling tumpang tindih ditambah lagi adanya organisme-organisme yang khas yang hanya terdapat pada daerah *ekotone* tersebut (Odum, 1994). *Mangrove* atau hutan *mangrove* merupakan salah satu contoh komunitas pada ekosistem pesisir yang dapat digolongkan menjadi *wetland*s (lahan basah) pesisir.

Secara ekologis, hutan *mangrove* berfungsi sebagai daerah pemijahan (*spawning grounds*) dan daerah pembesaran (*nursery grounds*) berbagai jenis ikan, udang, kerang-kerangan dan spesies lain. Selain itu, serasah *mangrove* (daun, ranting dan biomassa lainnya) yang jatuh di perairan dapat menjadi sumber pakan biota perairan dan unsur hara yang sangat menentukan produktivitas perikanan pada perairan laut. Hutan *mangrove* juga merupakan habitat bagi berbagai jenis burung, reptil, mamalia, dan sebagainya. Fungsi lain dari *mangrove* adalah sebagai pelindung daratan dari gempuran ombak, angin, perembesan air laut, dan gaya-gaya kelautan yang ganas lainnya (Bengen, 2002). Pada kenyataannya, masyarakat kurang sadar akan fungsi ekosistem *mangrove*. *Mangrove* dianggap sebagai tempat yang kotor untuk bersarang dan berkembangnya nyamuk malaria, lalat, dan berbagai jenis serangga lainnya. Hal ini mendorong terjadinya pembabatan *mangrove* yang berlebihan guna mengatasi timbulnya wabah penyakit tersebut. Persepsi lain yang keliru adalah *mangrove* dipandang sebagai sumber daya yang tidak memiliki nilai ekonomis tinggi bila dibandingkan dengan usaha budidaya perikanan.

Mangrove memiliki peranan yang signifikan dalam adaptasi dan mitigasi perubahan iklim, sumber mata pencaharian, ketahanan pangan serta perlindungan dari badai dan banjir (Krisnawati, 2017). Fungsi *mangrove* menurut Kusmana, Istomo, & Wibowo (2008) merupakan tempat pembiakan, bertelur, pembesaran, mencari makan, dan tempat tinggal bagi beberapa ikan, kerang-kerangan, udang-udangan, moluska dan satwa liar seperti burung. Selain itu, *mangrove* berfungsi sebagai penyangga terhadap ombak dan badai yang kuat, pelindung garis pantai, mencegah intrusi air laut, tempat perlindungan satwa liar dan tempat rekreasi. *Mangrove* merupakan ekosistem yang produktif. Berbagai produk dari *mangrove* dapat dihasilkan baik secara langsung maupun tidak langsung. Osmaleli, Kusumastanto, & Ekayani (2014) juga menyatakan bahwa kelestarian sumber daya udang sangat tergantung pada kelestarian *mangrove*. Penutupan *mangrove* memberikan kontribusi yang nyata terhadap hasil tangkapan udang harian pada selang kepercayaan 95.0% (Amrial, Hefni, & Ario, 2015). *Mangrove* dapat meningkatkan produksi ikan, udang maupun kepiting atau rajungan (Ismail, Sulistiono, Hariyadi, & Madduppa, 2019). Artinya, keberadaan *mangrove* di sekitar tambak dapat meningkatkan pendapatan petani tambak (Malau, Utomo, & Apandy, 2018).

Manfaat *mangrove* lainnya seperti daun *Xilocarpus sp*. dapat diolah menjadi lulur, *C.virosa* tergolong kacang-kacangan dapat diolah menjadi kecap kerandang, tempe kacang kerandang, susu kacang kerandang dan tahu kacang kerandang. Dodol dan sirup dapat dibuat dari buah *Soneratia spp*. Teh dapat dibuat dari *A. ilicifolius* yang memiliki khasiat dapat meredakan radang hati (hepatitis), pembesaran hati dan limpa, pembesaran kelenjar limpa, termasuk pembesaran kelenjar limpa pada tuberkulosis (TBC) kulit, gondongan, sesak napas, cacingan, nyeri lambung, sakit perut, kanker, terutama kanker hati. Kelompok tani hutan di Desa Karangsong Indramayu telah memanfaatkan daun *R. stylosa* menjadi kopi yang berkhasiat sebagai penambah stamina pria, daun *A. ilicifolius* dapat diolah menjadi keripik dan peyek serta menjadi teh yang berkhasiat sebagai antioksidan, tandan *N. fruticans* diolah menjadi gula yang dapat mencegah diabetes, buah *S. caseolaris* diolah menjadi dodol sirup dan permen, serta buah *Bruguiera spp.* dapat diolah menjadi coklat (Sugianto, 2019).

Permasalahan kompleks yang biasa terjadi di wilayah pesisir adalah pencemaran akibat limbah. Suatu wilayah dapat dikatakan tercemar apabila beban pencemar melebihi kapasitas asimilasi di wilayah tersebut. Terdapat beberapa sumber pencemaran bagi lingkungan perairan yaitu limbah industri dan limbah rumah tangga. Limbah rumah tangga akan terus bertambah sejalan dengan pertambahan jumlah penduduk di suatu wilayah. Air limbah domestik dapat meningkatkan organisme patogen, nutrien, dan beban organik pada ekosistem pesisir sehingga mengurangi kualitas air dan sedimen (Putnam, Gambrell, & Rusch, 2010). Pengelolaan limbah rumah tangga sangat membutuhkan perhatian khusus demi keberlanjutan ekosistem dan upaya menjaga kualitas lingkungan.

Ekosistem *mangrove* memiliki kemampuan dalam menyerap limbah organik baik yang dilakukan oleh individu *mangrove* maupun oleh ekosistemnya (Wu, Chung, NFY Tam, N Pi, & Wong, 2008). Oleh karena begitu banyak manfaat dari *mangrove*, maka upaya pengelolaan limbah di sekitar *mangrove* menjadi sangat penting. Parameter fisik kimia sangat perlu untuk diketahui. Dengan mengetahui parameter tersebut, maka dapat dianalisis dampaknya terhadap lingkungan *mangrove* dan dapat diketahui *mangrove* dalam keadaan sehat, tercemar atau telah terjadi alih fungsi lahan.

Pengukuran atau analisis untuk mengetahui kuantitas/ kadar parameter fisik kimia *mangrove* telah dilakukan dengan menggunakan pengukuran atau uji laboratorium. Dengan analisis tersebut hanya dapat diketahui secara kuantitas kadar dari masing-masing parameter pada daerah sekitar pengambilan sampel. Penyajiannya pun hanya dalam bentuk tabulasi saja dan tidak terlihat distribusinya.

Di sisi lain, seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi informasi saat ini, telah banyak penelitian yang mendorong penemuan baru dalam teknologi, salah satunya adalah Sistem Informasi Geografis (SIG), yang memberikan kemudahan kepada para pengguna atau para pengambil keputusan untuk menentukan kebijakan yang akan diambil, khususnya yang berkaitan dengan aspek keruangan (spasial). Telah banyak definisi SIG yang telah dikemukakan para ahli. Prahasta (2002) menyebutkan SIG adalah sistem komputer yang digunakan untuk mengumpulkan, memeriksa, mengintegrasikan,

dan menganalisis informasi-informasi yang berhubungan dengan permukaan bumi. Manfaat SIG sangat beragam mulai dari mengakomodasi penyimpanan, pemrosesan dan penayangan data spasial digital, bahkan integrasi data yang beragam, seperti citra satelit, foto udara, peta bahkan data statistik. Dengan fasilitas seperti komputer yang memiliki kecepatan dan kapasitas ruang penyimpanan yang besar seperti yang ada saat ini, SIG akan mampu memproses data dengan cepat dan akurat dan menampilkannya (Wibowo, Kanedi, & Jumadi, 2015). Salah satu aplikasi yang menyediakan data spasial yang berasal dari citra satelit adalah *Google Earth*. Pemanfaatan SIG di Indonesia sangat beragam, namun pemanfaatan data SIG sebagai sarana menganalisis lingkungan termasuk kerusakan lingkungan hutan belum banyak dilakukan, padahal data SIG lebih akurat dan tingkat efisiensinya tinggi (hemat tenaga, waktu, dan biaya) serta praktis penggunaannya (Nono et al., 2021).

Teknologi ini akan memudahkan dalam hal pemetaan. Sebagai contoh adalah pemanfaatannya dalam menganalisis *mangrove*, antara lain perubahan lahan *mangrove* dan pemetaan sebaran parameter fisik kimia *mangrove*. Dengan penggunaan SIG, distribusi parameter fisik kimia dapat dipetakan dan akan terlihat sebaran parameter secara spasial sehingga dapat diketahui nilai parameter di seluruh area penelitian. Dengan menggunakan pendekatan spasial (pemetaan), distribusi kerusakan *mangrove* dapat terlihat dengan jelas. Demikian halnya dengan daerah *mangrove* yang mengalami pencemaran atau kerusakan, juga akan terlihat.

Penelitian-penelitian terkait pemanfaatan SIG terhadap *mangrove* sudah mulai banyak dilakukan antara lain penelitian Nono et al. (2021) yang meneliti tentang pemanfaatan SIG dalam mengkaji perubahan luas hutan *mangrove* di Waecicu, Labuan Bajo; Hidayah (2019) yang meneliti penerapan SIG dalam menentukan kondisi kritis dan model rehabilitasi ekosistem bakau pada daerah pesisir selatan Pamekasan, Madura; Dwiputra, Mustofa, & Prasetyo (2020) yang meneliti aplikasi SIG untuk kajian perencanaan rehabilitasi hutan *mangrove* di Kecamatan Punduh Pedada, Lampung dan penelitian Dwiputra, Mustofa, & Prasetyo (2020) yang meneliti tentang Aplikasi Sistem Informasi Geografis untuk kajian perencanaan rehabilitasi hutan *mangrove* di Kecamatan Punduh Pedada, Lampung. Namun

demikian, penelitian terkait pemetaan fisik kimia pencemaran masih belum banyak dilakukan. Hal ini karena masih sukar mendapatkan referensi terkait penelitian tersebut.

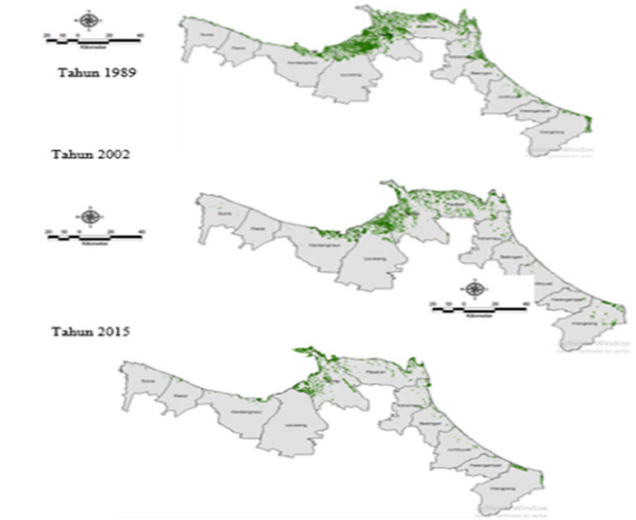
Berdasarkan latar belakang tersebut, maka tujuan penelitian ini adalah menganalisis pemetaan parameter fisik kimia *mangrove* dengan penggunaan SIG di pesisir Indramayu. Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu eksplorasi dan pengambilan data lapangan. Selanjutnya dilakukan analisis fisik kimia yaitu salinitas, fosfat, klorin, nitrat, dan unsur logam Pb melalui pengukuran manual ataupun laboratorium. Titik pengambilan sampel air dan sedimen ditetapkan untuk mengetahui kualitas air pada 3 titik yaitu titik pusat penduduk, pada ekosistem *mangrove*, dan pada titik tepat air akan keluar ke laut. Pengambilan sampel dilakukan dalam dua tahap, yaitu pada saat pasang tertinggi dan surut terendah. Pengambilan sampel air dilakukan secara langsung pada 3 lapisan kedalaman (permukaan, tengah, dan dasar) kemudian dikompositkan. Pengambilan sampel sedimen dilakukan dengan menggunakan *sedimen core* dengan masing-masing plot pengamatan diambil 3 layer yaitu pada kedalaman 10 cm, 30 cm, dan 60 cm. Sejalan dengan pengukuran tersebut, dilakukan pemetaan dengan SIG.

Teknologi SIG dapat dimanfaatkan untuk menganalisis masalah ekosistem *mangrove* maupun masalah lingkungan pada umumnya secara tepat dan efisien. Pada akhirnya, jika masalah ini telah terselesaikan, maka diharapkan dapat meningkatkan kualitas hidup manusia. Hal ini sejalan dengan industri 5.0 yang identik dengan peradaban manusia dan sinergi teknologi digital tanpa kehilangan jati diri manusia yang sebenarnya. Pendekatan pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi diperlukan untuk mempercepat pembangunan di era industri 5.0.

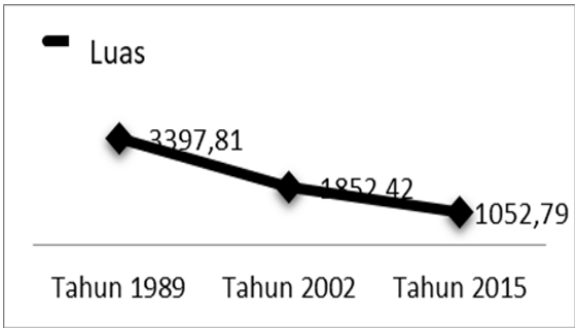
PEMBAHASAN

1. Penyebaran *Mangrove* di Kabupaten Indramayu Tahun 1989, 2002, dan 2015

Penyebaran *mangrove* di pesisir Indramayu mengalami perubahan yang signifikan dari tahun 1989 hingga tahun 2015. Hasil analisis dari citra landsat 5 tahun 1989, landsat 7 tahun 2002, dan landsat 8 tahun 2015 terlihat bahwa penyebaran *mangrove* di Kabupaten Indramayu tersebar merata di seluruh kecamatan yang berada di pinggiran pantai. Peta pada Gambar 1 memperlihatkan penyebaran *mangrove* di Kabupaten Indramayu pada tahun 1989, 2002, dan 2015, sedangkan Gambar 2 memperlihatkan grafik perubahan luas *mangrove* di Kabupaten Indramayu.



Gambar 1. Peta Penyebaran *Mangrove* Tahun 1989, 2002, dan 2015



Gambar 2. Grafik Perubahan Luas *Mangrove* di Kabupaten Indramayu Tahun 1989, 2002, dan 2015

Gambar 2 menunjukkan penyebaran *mangrove* di Kabupaten Indramayu dari tahun 1989 sampai 2015 cenderung mengalami penurunan. Pada tahun 1989, luas *mangrove* di Kabupaten Indramayu adalah 3397,81 ha, namun pada tahun 2002 luas *mangrove* di Kabupaten Indramayu menjadi 1.852,42 ha, dan pada tahun 2015 menjadi 1.052,79 ha. Perubahan terbesar terjadi pada rentang tahun 1989 sampai 2002 yaitu sebesar 1.545 ha, sedangkan perubahan *mangrove* yang terjadi pada rentang tahun 2002 sampai 2015 adalah 799,63 ha. Berdasarkan hasil wawancara dengan dinas terkait, perubahan *mangrove* periode tahun 1989 sampai dengan 2002 cukup besar karena pada saat itu masyarakat banyak yang melakukan konversi lahan *mangrove* menjadi lahan tambak. Hal ini senada dengan hasil penelitian Cabuy dan Wanna (2019) bahwa kerusakan *mangrove* antara lain disebabkan oleh perluasan areal permukiman, konversi lahan untuk tempat pengeringan ikan, tempat pembuangan sampah, aktivitas penebangan untuk kayu bakar, dan perluasan tubuh air bagi pertambakan di sekitar kawasan hutan *mangrove*. Perubahan luas *mangrove* tiap kecamatan di Kabupaten Indramayu dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Luas *Mangrove* Tiap Kecamatan di Kabupaten Indramayu

Kecamatan	Luas mangrove (ha)					
	Thn 1989	%	Thn 2002	%	Thn 2015	%
Sukra	16	0,4	1,1	0,6	3	0,2
Patrol	20	0,5	0,4	0,2	2	0,1
Kandanghaur	302	8,8	229,2	12,4	43	4,0
Losarang	568,2	16,7	228,4	12,3	236	22,4
Cantigi	1501	44,2	719	38,8	407	38,7
Pasekan	673	19,8	513,6	27,7	202	19,2
Indramayu	109	3,2	24	1,3	72	6,8
Balongan	65,3	1,9	2,9	0,1	9	0,8
Juntinyuat	47,5	1,4	2,0	0,1	9	0,8
Karangampel	8,5	0,2	2,2	0,1	0,3	0,0
Krangkeng	87,4	2,5	129,4	6,9	69	6,5
Jumlah	3.397,8	100	1.852,4	100	1052,7	100

Tabel 1 menunjukkan luas *mangrove* pada semua kecamatan di Kabupaten Indramayu mengalami penurunan. *Deforestasi* tertinggi terjadi pada periode tahun 1989 sampai dengan 2002 dan periode tahun 2002 sampai dengan 2015 di Kecamatan Cantigi. Hal ini senada dengan hasil penelitian Onrizal (2005) yang mendapatkan bahwa secara umum luas *mangrove* di Kabupaten Indramayu berdasarkan luas total setiap kecamatan cenderung mengalami penurunan dari tahun ke tahun.

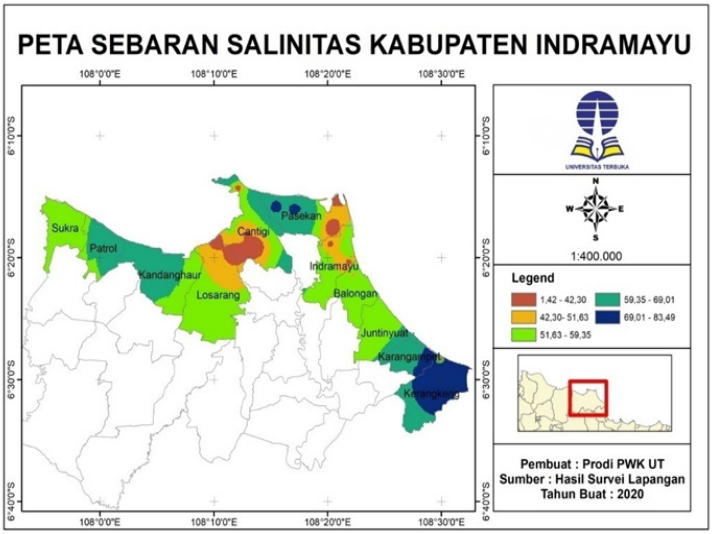
2. Parameter Fisik Kimia Perairan Mangrove

a. Salinitas

Berdasarkan hasil pengambilan sampel yang telah dilakukan pada 32 titik yang tersebar di Kabupaten Indramayu khususnya yang berdekatan dengan wilayah *mangrove*, terlihat bahwa sebaran salinitas seperti yang disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 3.

Tabel 2. Nilai Salinitas

No	Lokasi/ Kode Lapang	Salinitas (ppt)	No	Lokasi/ Kode Lapang	Salinitas (ppt)
1	Balongan/ BLGN 01	56,00	17	Krangkeng/ KRK 03	0,34
2	Balongan/ BLGN 02	59,50	18	Lamaran Tarung/ LMR 01	63,00
3	Balongan/ BLGN 03	0,54	19	Lamaran Tarung/ LMR 02	66,50
4	Brondong/ BRD 01	37,00	20	Lamaran Tarung/ LMR 3	2,50
5	Brondong/ BRG 02	20,00	21	Lamaran Tarung/ LMR1-2	62,00
6	Brondong/ BRG 03	10,00	22	Pasekan/ PSK 01	62,50
7	CemaraKulon/ CMK 1	35,00	23	Pasekan/ PSK 02	65,00
8	CemaraKulon/ CMK 2	32,00	24	Pasekan/ PSK 03	71,00
9	Cemara/ CMR 1	54,50	25	Singaraja/ SNG 01	39,00
10	Cemara/ CMR 2	41,00	26	Karangsong/ SNG 02	61,00
11	Cemara/ CMR 3	17,00	27	Singaraja/ SNG 03	18,50
12	Eretan/ ERTN 01	67,50	28	Karangsong/ SONG 01	57,50
13	Eretan/ ERTN 02	64,00	29	Karangsong/ SONG 02	55,00
14	Eretan/ ERTN 03	54,00	30	Karangsong/ SONG 03	1,22
15	Krangkeng/ KRK 01	41,40	31	Totoran/ TTR 01	64,00
16	Krangkeng/ KRK 02	83,50	32	Totoran/ TTR 02	72,50



Gambar 3. Peta Sebaran Salinitas

Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 3 terlihat bahwa nilai salinitas tertinggi sebesar 64,00 ppt terdapat pada kawasan *mangrove* di Kecamatan Krangkeng, sedangkan salinitas terendah sebesar 0,34 ppt terdapat pada kawasan pemukiman, masih di Kecamatan Krangkeng.

Salinitas adalah banyaknya zat padat terlarut, meliputi garam-garam anorganik, senyawa-senyawa organik yang berasal dari organisme hidup, dan gas-gas terlarut (Nybakken, 1992). Fluktuasi salinitas di perairan dapat dipengaruhi oleh penguapan, sirkulasi air, curah hujan dan banyaknya air tawar yang memasuki perairan tersebut (Yasin, 2019).

Dalam kehidupan organisme perairan, salinitas mempunyai peranan penting. Salinitas dapat mempengaruhi tekanan osmotik dan berpengaruh pula terhadap organisme perairan. Dedi dalam Yasin (2019) mengemukakan bahwa salinitas optimum yang dibutuhkan *mangrove* untuk tumbuh berkisar antara 10-30 ppt. Tinggi rendahnya salinitas akan mempengaruhi terhadap tumbuhan yang berada di sekitar *mangrove*. Kondisi

salinitas perairan yang rendah menjadi indikator keberadaan jenis tumbuhan *mangrove* yang didominasi oleh *Sonneratia caseolaris* atau pedada. Tumbuhan *mangrove* umumnya dapat beradaptasi dan mempunyai toleransi yang tinggi terhadap kondisi salinitas perairan dibandingkan tumbuhan yang bukan *mangrove*. Sebagai contoh, semaian *Rhizophora mucronata* dapat tumbuh baik pada salinitas 30 ppt dan *R. apiculata* dapat tumbuh pada salinitas 15 ppt (Zamdial, 2016).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa salinitas rendah berada pada daerah pemukiman tepatnya pada perairan *mangrove* yang telah tercampur dengan perairan pemukiman. Sebaliknya, untuk Kecamatan Kerangkeng mempunyai salinitas tinggi karena merupakan perairan murni *mangrove*.

b. Fosfat

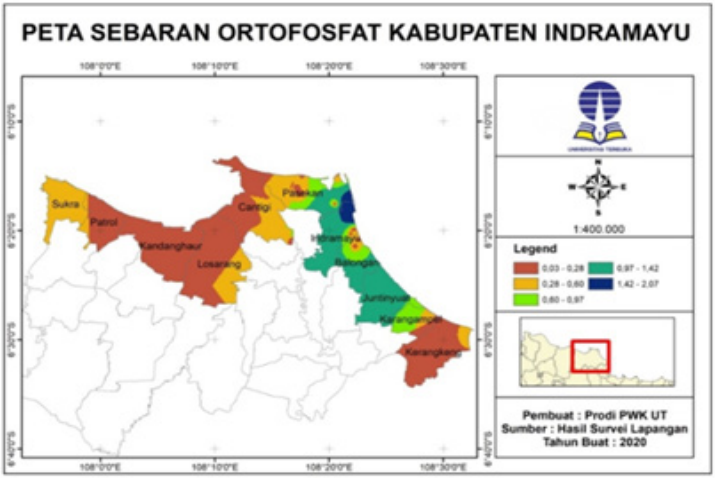
Hasil penelitian untuk sebaran fosfat pada daerah *mangrove* dan sekitarnya seperti yang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Sebaran Fosfat

No	Lokasi/ Kode Lapang	Fosfat (mg/100g)	No	Lokasi/ Kode Lapang	Fosfat (mg/100g)
1	Balongan/ BLGN 01	0,03	17	Krangkeng/ KRK 03	0,19
2	Balongan/ BLGN 02	0,09	18	Lamaran Tarung/ LMR 01	0,03
3	Balongan/ BLGN 03	0,09	19	Lamaran Tarung/ LMR 02	0,06
4	Brondong/ BRD 01	0,19	20	Lamaran Tarung/ LMR 3	0,09
5	Brondong/ BRG 02	0,12	21	Lamaran Tarung/ LMR1-2	0,03
6	Brondong/ BRG 03	0,34	22	Pasekan/ PSK 01	0,05

No	Lokasi/ Kode Lapang	Fosfat (mg/100g)	No	Lokasi/ Kode Lapang	Fosfat (mg/100g)
7	Cemara Kulon/ CMK 1	0,09	23	Pasekan/ PSK 02	0,12
8	Cemara Kulon/ CMK 2	0,06	24	Pasekan/ PSK 03	0,37
9	Cemara/ CMR 1	0,06	25	Singaraja/ SNG 01	0,16
10	Cemara/ CMR 2	0,22	26	Karangsong/ SNG 02	0,16
11	Cemara/ CMR 3	0,28	27	Singaraja/ SNG 03	0,09
12	Eretan/ ERTN 01	0,09	28	Karangsong/ SONG 01	0,03
13	Eretan/ ERTN 02	0,19	29	Karangsong/ SONG 02	2,08
14	Eretan/ ERTN 03	0,47	30	Karangsong/ SONG 03	1,21
15	Krangkeng/ KRK 01	0,25	31	Totoran/ TTR 01	0,03
16	Krangkeng/ KRK 02	0,31	32	Totoran/ TTR 02	0,22

Tabel 4 memperlihatkan nilai fosfat tertinggi sebesar 2,08 mg/100g terdapat pada kawasan *mangrove* di Kecamatan Indramayu Desa Karangsong, sedangkan fosfat terendah dengan nilai 0,03 mg/100g terdapat pada 4 titik yaitu Kecamatan Balongan dengan lokasi di kawasan muara, Desa Lamaran Tarung dengan lokasi di kawasan muara, Desa Lamaran Tarung dengan lokasi kawasan muara sungai dan *mangrove,* dan Desa Karangsong dengan lokasi di kawasan permukiman. Secara spasial, sebaran fosfat di Kabupaten Indramayu seperti yang disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Peta sebaran Fosfat di Kabupaten Indramayu

Kandungan fosfat yang berbeda pada sedimen dikarenakan perbedaan proses dekomposisi yang terjadi. Bahan organik yang terdekomposisi dengan bantuan mikroba nantinya akan menjadi sumber fosfat sehingga proses dekomposisi mempengaruhi pengayaan unsur hara. Pada ekosistem *mangrove*, pengaruh arus lebih dominan dalam mempengaruhi dekomposisi serasah. Alamsyah, Marni, Fattah, Liswahyuni & Permatasari (2019) menyatakan bahwa laju dekomposisi akan lebih tinggi untuk kawasan yang dekat dengan daratan dibandingkan dengan zona dekat laut ataupun zona tengah, sehingga kadar fosfat nya akan tinggi pula di daerah yang dekat dengan darat. Pada penelitian ini, kadar fosfat yang tinggi berada pada daerah Karongsong, kawasan yang dekat dengan daratan, sedangkan kadar fosfat yang rendah berada di kawasan muara, daerah yang dekat dengan laut, sehingga dipengaruhi oleh arus laut.

Bila dihubungkan dengan klasifikasi kesuburan *mangrove*, Supriyantini, Santoso & Soenardjo (2018) menyebutkan bahwa, kandungan fosfat 0,00 - 0,20 mg/100g diklasifikasikan sebagai kesuburan rendah, 0,21 - 0,50 mg/100g tingkat kesuburan

sedang, 0,51 - 1 mg/100g tingkat kesuburan baik, dan nilai fosfat > 1 mg/100g tingkat kesuburan yang sangat baik. Berdasarkan hasil analisis, kadar fosfat di pesisir Indramayu tergolong tingkat kesuburan rendah hingga sedang, karena nilainya berkisar antara 0,03 – 2,08 mg/100g.

c. Nitrat

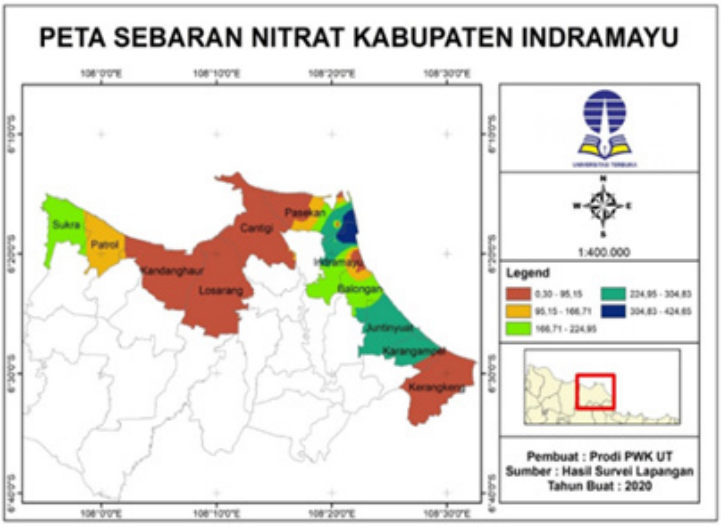
Hasil penelitian kandungan nitrat pada daerah *mangrove* pesisir Indramayu dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai Nitrat

No	Lokasi/ Kode Lapang	Nitrat (mg/l)	No	Lokasi/ Kode Lapang	Nitrat (mg/l)
1	Balongan/ BLGN 01	13,27	17	Krangkeng/ KRK 03	0,23
2	Balongan/ BLGN 02	20,41	18	Lamaran Tarung/ LMR 01	14,74
3	Balongan/ BLGN 03	2,04	19	Lamaran Tarung/ LMR 02	3,86
4	Brondong/ BRD 01	64,06	20	Lamaran Tarung/ LMR 3	15,31
5	Brondong/ BRG 02	8,05	21	Lamaran Tarung/ LMR1-2	0,91
6	Brondong/ BRG 03	3,40	22	Pasekan/ PSK 01	5,50
7	Cemara Kulon/ CMK 1	34,58	23	Pasekan/ PSK 02	65,20
8	Cemara Kulon/ CMK 2	3,74	24	Pasekan/ PSK 03	1,47

No	Lokasi/ Kode Lapang	Nitrat (mg/l)	No	Lokasi/ Kode Lapang	Nitrat (mg/l)
9	Cemara/ CMR 1	8,62	25	Singaraja/ SNG 01	48,76
10	Cemara/ CMR 2	79,94	26	Karangsong/ SNG 02	58,39
11	Cemara/ CMR 3	92,98	27	Singaraja/ SNG 03	27,21
12	Eretan/ ERTN 01	12,93	28	Karangsong/ SONG 01	26,99
13	Eretan/ ERTN 02	3,97	29	Karangsong/ SONG 02	425,20
14	Eretan/ ERTN 03	207,50	30	Karangsong/ SONG 03	0,23
15	Krangkeng/ KRK 01	17,01	31	Totoran/ TTR 01	41,95
16	Krangkeng/ KRK 02	2,27	32	Totoran/ TTR 02	82,77

Tabel 4 menunjukkan nilai nitrat tertinggi sebesar 425,20 mg/l terdapat pada kawasan *mangrove* di Desa Karangsong Kecamatan Karangsong, sedangkan nitrat terendah dengan nilai 0,23 mg/l terdapat pada 2 titik yaitu Desa Krangkeng dan Desa Karangsong, keduanya terdapat pada daerah pemukiman. Secara spasial, sebaran nitrat di Kabupaten Indramayu seperti yang disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Peta Sebaran Nitrat di Kabupaten Indramayu

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nitrat tertinggi terdapat pada kawasan *mangrove*. Rentang kadar nitrat ini sangat besar dari 0,23-425,20 mg/l. Hal ini dapat disebabkan oleh berbagai kegiatan yang terjadi di dekat lokasi penelitian, yaitu pemukiman dan industri. Pernyataan ini diperkuat oleh hasil penelitian Citra, Supriharyono, & Suryani (2020) yang mendapatkan kandungan nitrat yang bervariasi pada lokasi penelitian kemungkinan disebabkan oleh kegiatan yang terjadi dekat dengan pertambakan dan pemukiman penduduk menyebabkan sumber nitrat masuk ke kawasan *mangrove* yang terbawa oleh aliran sungai. Demikian pula penelitian yang dilakukan Dewi, Dirgayusa, & Suteja, (2017) yang mendapatkan bahwa kandungan nitrat semakin tinggi biasanya ditemukan di daerah muara dan akan makin tinggi bila menuju pantai. Hal ini disebabkan adanya sumber nitrat dari daratan berupa buangan limbah dari kegiatan antropogenik.

d. Timbal (Pb)

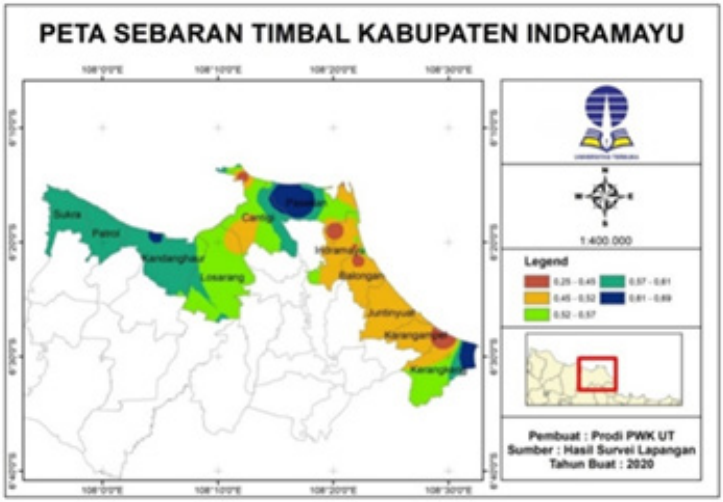
Berdasarkan hasil pengambilan sampel yang telah dilakukan pada 32 titik yang tersebar di Kabupaten Indramayu khususnya yang berdekatan dengan wilayah *mangrove*, terlihat bahwa sebaran timbal seperti yang disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai Timbal di Kabupaten Indramayu

No	Lokasi/ Kode Lapang	Timbal (mg/l)	No	Lokasi/ Kode Lapang	Timbal (mg/l)
1	Balongan/ BLGN 01	0,53	17	Krangkeng/ KRK 03	0,37
2	Balongan/ BLGN 02	0,59	18	Lamaran Tarung/ LMR 01	0,59
3	Balongan/ BLGN 03	0,32	19	Lamaran Tarung/ LMR 02	0,58
4	Brondong/ BRD 01	0,54	20	Lamaran Tarung/ LMR 3	0,39
5	Brondong/ BRG 02	0,56	21	Lamaran Tarung/ LMR1-2	0,59
6	Brondong/ BRG 03	0,33	22	Pasekan/ PSK 01	0,56
7	Cemara Kulon/ CMK 1	0,53	23	Pasekan/ PSK 02	0,65
8	Cemara Kulon/ CMK 2	0,48	24	Pasekan/ PSK 03	0,69
9	Cemara/ CMR 1	0,00	25	Singaraja/ SNG 01	0,47
10	Cemara/ CMR 2	0,51	26	Karangsong/ SNG 02	0,58
11	Cemara/ CMR 3	0,00	27	Singaraja/ SNG 03	0,39

No	Lokasi/ Kode Lapang	Timbal (mg/l)	No	Lokasi/ Kode Lapang	Timbal (mg/l)
12	Eretan/ ERTN 01	0,61	28	Karangsong/ SONG 01	0,55
13	Eretan/ ERTN 02	0,63	29	Karangsong/ SONG 02	0,52
14	Eretan/ ERTN 03	0,61	30	Karangsong/ SONG 03	0,25
15	Krangkeng/ KRK 01	0,54	31	Totoran/ TTR 01	0,61
16	Krangkeng/ KRK 02	0,70	32	Totoran/ TTR 02	0,67

Berdasarkan Tabel 5 terlihat bahwa nilai timbal tertinggi sebesar 0,70 mg/l terdapat pada kawasan *mangrove* di Desa Tanjakan Kecamatan Kerangkeng, sedangkan timbal terendah dengan nilai 0,00 terdapat pada 2 titik yaitu Desa Cemara Kecamatan Cantigi pada kawasan muara atau perbatasan pantai, dan Desa Cemara Kecamatan Cantigi pada kawasan pemukiman. Secara spasial sebaran timbal di Kabupaten Indramayu seperti yang disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Peta Sebaran Timbal di Kabupaten Indramayu

Menurut Alisa, Albirqi, & Faizal (2020), limbah timbal dapat berasal dari aktivitas manusia di laut yang berasal dari pembuangan sampah kapal, penambangan logam di laut, dan lain-lain, serta yang berasal dari darat seperti limbah perkotaan, pertambangan, pertanian dan perindustrian. Logam berat yang sudah melebihi ambang batas akan berdampak pada mahluk hidup di perairan dan dapat menyebabkan kerugian, dan kesehatan masyarakat di sekitarnya juga akan terganggu. Pencemaran timbal (Pb) di dalam perairan apabila lebih dari konsentrasi ambang batas akan berdampak pada kematian biota di perairan tersebut, dan berdampak pula pada berkurangnya keanekaragaman hayati. Selanjutnya dapat menyebabkan ekologis perairan menjadi terganggu.

Mengacu pada Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 51 tahun 2004, baku mutu kadar logam berat Pb untuk perairan laut adalah 0,005 mg/l untuk wisata bahari dan 0,008 mg/l untuk biota laut. Pada hasil penelitian ini, kadar timbal tertinggi adalah 0,70 mg/l berada pada Kecamatan Kerangkeng. Kadar ini sudah sangat melebihi ambang batas baku mutu yang

diperbolehkan. Dengan demikian, daerah perairan *mangrove* di Kabupaten Indramayu telah tercemar. Pencemaran ini dapat disebabkan oleh kegiatan industri yang berada pada lingkungan *mangrove*, sedangkan pada muara, kadar timbal tidak terdeteksi.

e. Klorin (Cl)

Berdasarkan hasil pengambilan sampel yang telah dilakukan pada 32 titik yang tersebar di Kabupaten Indramayu khususnya yang berdekatan dengan wilayah *mangrove*, terlihat bahwa sebaran klorin seperti yang disajikan pada Tabel 6.

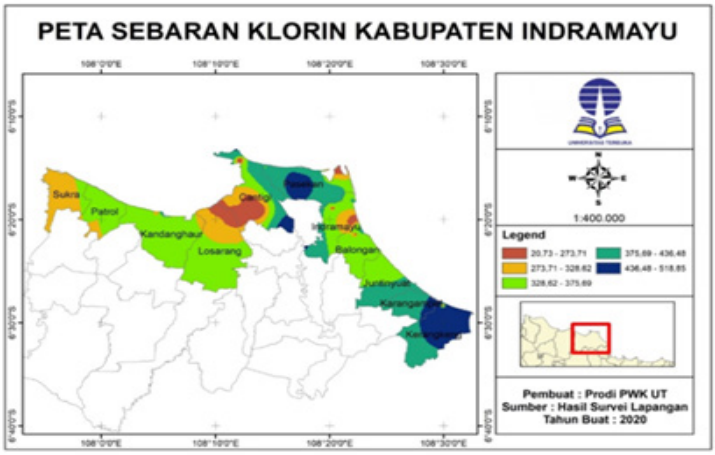
Tabel 6. Nilai Klorin di Kabupaten Indramayu

No	Lokasi/ Kode Lapang	Timbal (mg/l)	No	Lokasi/ Kode Lapang	Timbal (mg/l)
1	Balongan/ BLGN 01	418,86	17	Krangkeng/ KRK 03	0,69
2	Balongan/ BLGN 02	338,44	18	Lamaran Tarung/ LMR 01	439,93
3	Balongan/ BLGN 03	6,24	19	Lamaran Tarung/ LMR 02	522,52
4	Brondong/ BRD 01	208,06	20	Lamaran Tarung/ LMR 3	19,42
5	Brondong/ BRG 02	412,96	21	Lamaran Tarung/ LMR1-2	431,50
6	Brondong/ BRG 03	227,55	22	Pasekan/ PSK 01	375,30
7	Cemara Kulon/ CMK 1	212,22	23	Pasekan/ PSK 02	487,96
8	Cemara Kulon/ CMK 2	181,70	24	Pasekan/ PSK 03	436,23

No	Lokasi/ Kode Lapang	Timbal (mg/l)	No	Lokasi/ Kode Lapang	Timbal (mg/l)
9	Cemara/ CMR 1	326,65	25	Singaraja/ SNG 01	241,35
10	Cemara/ CMR 2	237,88	26	Karangsong/ SNG 02	252,87
11	Cemara/ CMR 3	112,35	27	Singaraja/ SNG 03	246,93
12	Eretan/ ERTN 01	412,65	28	Karangsong/ SONG 01	310,14
13	Eretan/ ERTN 02	293,36	29	Karangsong/ SONG 02	397,79
14	Eretan/ ERTN 03	231,10	30	Karangsong/ SONG 03	4,21
15	Krangkeng/ KRK 01	224,01	31	Totoran/ TTR 01	407,27
16	Krangkeng/ KRK 02	518,76	32	Totoran/ TTR 02	456,34

Sumber: Warlina, Susanto, Sumartono, & Sodikin, 2020

Berdasarkan Tabel 6 terlihat bahwa nilai klorin tertinggi sebesar 522,52 mg/l terdapat pada kawasan *mangrove* di Desa Lamaran Tarung, Kecamatan Lamaran, sedangkan klorin terendah yakni sebesar 0,69 mg/l terdapat di kawasan pemukiman tepatnya di Desa Krangkeng, Kecamatan Krangkeng. Secara spasial, sebaran klorin di Kabupaten Indramayu seperti yang disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Sebaran Klorin di Kabupaten Indramayu

Klorin biasa dijumpai dalam bentuk ikatan dengan senyawa lain atau membentuk garam natrium klorida (NaCl). Banyak benda sehari-hari yang mengandung klorin, antara lain peralatan rumah tangga, alat-alat kesehatan, kertas, obat-obat farmasi, pendingin, pembersih, pelarut dan sebagainya. Di sisi lain, klorin mempunyai dampak yang negatif bagi manusia dan lingkungan. Berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor Kep-51/MenLH/10/1995 tentang Baku Mutu Limbah Cair bagi Kegiatan Industri, ditetapkan bahwa parameter dan batasan konsentrasi klorin dari limbah cair adalah 1 mg/l dalam bentuk klorin bebas (Cl_2). Mengacu pada ketetapan tersebut, maka sekitar *mangrove* di Kabupaten Indramayu terutama Kecamatan Balongan yang merupakan daerah pemukiman telah tercemar klorin. Klorin pada perairan *mangrove* dapat berasal dari limbah domestik dari pemukiman di sekitar *mangrove*. Hal ini harus menjadi perhatian pemerintah setempat akan dampak yang ditimbulkannya.

KESIMPULAN

Sistim Informasi Geografis (SIG) dapat digunakan untuk pemetaan parameter fisik kimia *mangrove* di pesisir Indramayu. Berdasarkan pemetaan tersebut, maka dapat diketahui kecamatan-kecamatan yang mempunyai kadar pencemar yang melebihi standar yang diperbolehkan sehingga dapat dilakukan penanganan yang tepat pada daerah tersebut.

Sebaran pencemar tertinggi di kawasan *mangrove* di Kabupaten Indramayu: salinitas tertinggi sebesar 64,00 ppt terdapat di Kecamatan Krangkeng, fosfat tertinggi sebesar 2,08 mg/100g terdapat di Desa Karangsong Kecamatan Indramayu, nitrat tertinggi sebesar 425,20 mg/l terdapat di Desa Karongsong Kecamatan Karongsong, timbal tertinggi sebesar 0,70 mg/l terdapat di Desa Tanjakan Kecamatan Kerangkeng; sedangkan khlorin tertinggi sebesar 522,52 mg/l terdapat di kawasan pemukiman di Desa Lamaran Tarung Kecamatan Lamaran.

DAFTAR PUSTAKA

Alisa, C.A.G , Albirqi P.M.S. , & Faizal, I. (2020). Kandungan timbal dan kadmium pada air dan sedimen di perairan Pulau Untung Jawa, Jakarta. *Jurnal Akuatika Indonesia*, 5(1), 21-26.

Alamsyah, R., M. Marni., N. Fattah., A. Liswahyuni & A. Permatasari. (2019). Laju dekomposisi serasa daun mangrove di kawasan wisata Tongke-Tongke Kabupaten Sinjai. *Agrominansia*, 3(1), 72–77

Amrial, Y., Hefni, E., & Ario, D. (2015). Pengelolaan ekosistem mangrove berbasis *silvofishery* di Kecamatan Cibuaya, Kabupaten Karawang. *Jurnal Kebijakan Sosial ekonomi*, 5(1).

Bengen, D.G. (2002). *Pedoman teknis pengenalan dan pengelolaan ekosistem mangrove*. Bogor. Indonesia: Pusat Kajian Sumberdaya Pesisir dan Lautan–Institut Pertanian Bogor.

Cabuy, N.H.K.R.L. & Wanma, A.O. (2019). Identifikasi kerusakan areal hutan mangrove akibat aktivitas penduduk di daerah Airtiba Kabupaten Kaimana. *Jurnal Kehutanan Papuasia,* 5 (2), 153–163.

Citra, Supriharyono & Suryani, (2020). Analisis kandungan bahan organik, nitrat dan fosfat pada sedimen mangrove Jenis *Avicennia* dan *Rhizophora* di Desa Tapak Tugurejo, Semarang. *Journal of Maquares,* 9(2), 107-114. (E-ISSN: 2721)

Dewi, N. N. D. K., I. G. N. P. Dirgayusa & Y. Suteja. (2017). Kandungan nitrat dan fosfat sedimen serta keterkaitannya dengan kerapatan mangrove di kawasan Mertasari di aliran sungai TPA Suwung Denpasar, Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 3(2), 180–190.

Dwiputra, M.A., Mustofa, A., & Prasetyo,B.A. (2020). Aplikasi Sistem Informasi Geografis untuk kajian perencanaan rehabilitasi hutan mangrove di Kecamatan Punduh Pedada, Lampung *Journal of Science and Applicative Technology,* 4(2), 67-74.

Hidayah, Z. (2019). Penerapan SIG dalam menentukan kondisi kritis dan model rehabilitasi ekosistem bakau pada daerah pesisir selatan Pamekasan, Madura. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan,* 7(1), 79-86.

Ismail, Sulistiono, Hariyadi, S., & Madduppa, H. (2019). Hubungan antara degradasi mangrove segara anakan dan penurunan hasil tangkapan kepiting bakau (*Scylla* sp.) di Kabupaten Cilacap, Provinsi Jawa Tengah. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 24(3), 179-187. doi: 10.18343/jipi.24.3.179.

Karnadi, A. (2022). Garis pantai Indonesia terpanjang ketiga di dunia. Retrieved from https://dataindonesia.id/ragam/detail/garis-pantai-indonesia-terpanjang-ketiga-di-dunia

Krisnawati H. (2017). Mangrove memelihara bentang kehidupan, lahan dan laut. Badan Penelitian, Pengembangan dan Inovasi Pusat Penelitian dan Pengembangan Hutan. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. *Media Brief*. Bogor (ID).

Kusmana C., Istomo, & Wibowo C. (2008). *Manual silvikultur mangrove di Indonesia*. Jakarta (ID) : Korea International Cooperation Agency (Koica) the Rehabilitation Mangrove Forest and Coastal Area Damaged by Tsunami in Aceh Project.

Malau, A., Utomo, B., & Apandy, ZH. (2018). Perubahan luasan mangrove dan hubungannya dengan produksi perikanan di Kota Langsa Provinsi Aceh. *Jurnal Aquacoastmarine*. 6(1).

Nono, K.M., Refli, Momo, A.N., Ike Septa F. M., Amalo, Dj., & Wua, P.E.V. (2021). Pemanfaatan Sistem Informasi Geografis (SIG) dalam mengkaji perubahan luas hutan mangrove di Waecicu Timur, Labuan Bajo. *Jurnal Biotropikal Sains.* Vol. 18, No. 1 Februari 2021 (Hal 97 – 105)

Nurhadi, M. (2022). Menghitung luas Indonesia, negara kepulauan terbesar di dunia. Retrieved from https://www.suara.com/bisnis/2022/06/14/152602/menghitung-luas-indonesia-negara-kepulauan-terbesar-di-dunia?page=all

Nybakken, J.W. (1992). *Biologi laut suatu pendekatan ekologi*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka.

Odum, E.P. (1994). *Dasar-dasar Ekologi, edisi ke 3*. Jogyakarta. Indonesia: Gajah Mada University Press.

Onrizal. (2002). Evaluasi kerusakan kawasan mangrove dan alternatif rehabilitasinya di Jawa Barat dan Banten [intenet]. Retreived from: https://www.researchgate.net/publication/42320137.

Osmaleli, Kusumastanto, T., & Ekayani M. (2014). Analisis ekonomi keterkaitan ekosistem mangrove dengan sumberdaya udang. *Jaree*. 1, 61-70.

Prahasta, E. (2002). *Sistem Informasi Geografis*: *Konsep-konsep dasar informasi goegrafis*. Bandung: Informatika Bandung.

Putnam LA, RP. Gambrell, & KA Rusch. (2010). CBOD5 treatment using the marshland upwelling sistem. *J. Ecoleng*, 36, 548-559.

Sugianto. (2019). Diversifikasi produk olahan mangrove bisa meningkatkan kesejahteraan masyarakat Pesisir Indramayu. *Mangifera Edu*. 3 (2): 133-139.

Supriyantini, E., Santoso A., & Soenardjo, N. (2018). Nitrate and phosphate contents on sediments related to the density levels of mangrove rhizophora sp. in Mangrove Park Waters of Pekalongan, Central Java. *IOP Conference Series*: *Earth and Environmental Science*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/116/1/012013

Warlina, L., Susanto, A., Sumartono, Sodikin. (2020). Hubungan ekostruktur mangrove dengan karakteristik lingkungan dan kapasitas asimilasi pesisir di Kabupaten Indramayu. Laporan Hasil Penelitian, LPPM, UT.

Wibowo, K., Kanedi, I. & Jumadi, J. (2015). Sistem Informasi Geografis (SIG) menentukan lokasi pertambangan batu bara di Provinsi Bengkulu berbasis web. *Jurnal Media Infotama*, 11(1), 51 – 60

Wu Y, A Chung, NFY Tam, N Pi, & MH Wong. (2008). Constructed mangrove wetland as secondary treatment system for municipal wastewater. *J. Ecoleng*, 34, 137-146.

Yasin, A. (2019). Analisis parameter fisika-kimia untuk kepentingan rehabilitasi ekosistem mangrove di pesisir Pulau Bungkutoko Kota Kendari. *JGG-Jurnal Green Growth dan Manajemen Lingkungan,* 8(1) DOI : doi.org/10.21009/jgg.081.05.

Zamdial. (2016). Analisa struktur komunitas hutan mangrove di Desa Pasar Sebelah Kecamatan Kota Mukomuko Kabupaten Mukomuko. *Jurnal Enggano,* 1(2), 29-37.

PROGRAM BANDUNG HIJAU DAN BERSIH: PARADIGMA LINGKUNGAN DAN KEBIJAKAN PUBLIK DALAM PENGELOLAAN SAMPAH

GREEN AND CLEAN BANDUNG PROGRAM: ENVIRONMENTAL PARADIGM AND PUBLIC POLICY IN WASTE MANAGEMENT

A Hadian Pratama Hamzah[1*], Nurhasanah[1], Sohifah[2]

[1]Magister Studi Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka
[2]Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Jawa Barat, Comp. Istana Kawaluyaan

*hadian@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Keberlanjutan lingkungan menuju masyarakat 5.0 merupakan salah satu tujuan dari SDGS. Salah satu fenomena tumpukan sampah menjadi satu hal yang perlu diselesaikan secara bersama lintas sektoral. Faktor pelaksanaan program pengelolaan sampah di Kota Bandung menunjukkan bahwa dilaksanakannya program Bandung Green and Clean (BGC) untuk meningkatkan pengetahuan masyarakat tentang pengelolaan sampah serta mengubah perilaku masyarakat dalam mengelola sampah melalui pemilahan sampah, pengomposan, dan pengolahan sampah, daur ulang sampah, sampah anorganik dan adanya transaksi sampah anorganik/ Bank Sampah sehingga mengurangi volume sampah yang dibuang ke TPA. Program Karakteristik dibangun bekerja sama dengan pemerintah dan Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup Bandung, Yayasan Unilever, Lembaga Aplikasi Teknologi Tepat Guna, Media Pikiran Rakyat, Media Radio Rase FM, dan Tim Bina Kesejahteraan Keluarga Bandung. Peran pemerintah sebagai pembuat kebijakan dengan mengeluarkan Bandung Hijau dan Bersih merupakan kebijakan pengelolaan daerah melalui kebijakan publik. Integrasi dan komitmen dari seluruh mitra BGC dalam pelaksanaan seluruh program BGC khususnya pengelolaan sampah menjadikan program BGC berjalan sesuai dengan maksud dan tujuan program. Variabel dukungan

masyarakat dalam pelaksanaan program BGC terkait dengan sampah berupa keterlibatan masyarakat dalam pelaksanaan program. Dengan adanya partisipasi masyarakat dalam program pengelolaan sampah yang dilakukan oleh BGC mulai dari tahap perencanaan, tahap pelaksanaan program, dan tahap pemanfaatan dan pengendalian program akan menjamin keberlanjutan kegiatan. Persatuan warga terkait pengelolaan sampah diwujudkan dalam berbagai bentuk kegiatan pelatihan yang diadakan oleh BGC. Fasilitator telah diberikan berbagai pelatihan dan pengetahuan lingkungan khususnya dalam pengelolaan sampah, pelatihan Bank Sampah, pelatihan daur ulang sampah anorganik, dan pelatihan kampanye pembuatan kompos, sehingga kegiatan pengelolaan sampah dapat terwujud walaupun dana yang digunakan dalam pelaksanaan kegiatan komunitas ini- program pengelolaan sampah berbasis sepenuhnya berasal dari diri mereka sendiri.

Kata Kunci: *evaluasi lingkungan, partisipatif masyarakat, program bandung hijau dan bersih*

ABSTRACT

Environmental sustainability towards society 5.0 is one of the goals of the SDGS, one of the phenomena of piles of waste is one thing that needs to be solved jointly across sectors. The Factors Triggering the Implementation of the Waste Management Program in Bandung indicate that the purpose of implementing the Bandung Green and Clean program is not only aimed at increasing public knowledge about waste management but rather at changing people's behavior in managing waste through waste sorting, composting, and recycling waste. inorganic waste and the existence of inorganic waste transactions/Waste Banks thereby reducing the volume of waste disposed of in landfills. Program Characteristics was built in collaboration with the government and the Bandung Environmental Management Agency, the Unilever Foundation, the Institute for Appropriate Technology Applications, the People's Mind Media, Rase FM Radio Media, and the Bandung Family Welfare Development Team. The role of the government as a policy maker by issuing a Green and Clean Bandung is a regional management policy through public policy. Integration and commitment from all BGC partners in the implementation of all BGC programs, especially waste management, makes the BGC program run according to the program's goals and objectives. The variable of community support in the implementation of the BGC program is related

to waste in the form community involvement in program implementation. With the participation of the community in the waste management program carried out by BGC starting from the planning stage, program implementation stage, and program utilization stage, it will ensure the success of the program. Community participation in the implementation of BGC programs. Citizens' associations related to waste are manifested in various forms of training activities held by BGC. Facilitators have been provided with various trainings and environmental knowledge, especially in waste management, Waste Bank training, inorganic waste recycling training, and composting campaign training, so that waste management activities can be realized even though the funds used in the implementation of this community-based waste management program come entirely from their self.

Keywords: *environmental evaluation, public participatory, bandung green and clean program*

PENDAHULUAN

Pengelolaan lingkungan yang bersumber dari kebijakan pusat terkadang tidak selalu sejalan dengan implementasinya di tingkat masyarakat, hal ini dipengaruhi oleh banyak faktor diantaranya adalah kejelasan kebijakan, pelaksana kebijakan, dan komunikasi dalam kebijakan (Marwiyah, 2022). Berbagai program terus diupayakan oleh Pemerintah Kota Bandung untuk mengatasi permasalahan sampah dan lingkungan, diantaranya adalah program Bandung Green Clean (BGC) yang fokus pada isu hijau dan kebersihan, khususnya pengelolaan sampah berbasis masyarakat. Ada 1.556 RW yang tersebar di 151 kelurahan dan 30 kecamatan di Bandung. Program BGC 2018 diikuti 100 RW, 2019 disusul 200 RW, 2020 disusul 373 RW, dan 2021 disusul 619 RW (Agustina et al., 2020). Evaluasi program BGC sebelumnya dilakukan berdasarkan evaluasi keberhasilan pelaksanaan proyek BGC dari sisi proyek, yaitu: 1) pemberdayaan masyarakat; 2) kebersihan melalui pengelolaan sampah; 3) proyek hijau; 4) pengayaan air dengan metode pengisian air tanah dan sumur resapan; 5) hemat energi, dan 6) replikasi ke Sekretariat BGC daerah lain. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menilai keberhasilan pelaksanaan program BGC di Kota Bandung terkait dengan pertimbangan faktor-faktor yang mempengaruhi pelaksanaan program pengelolaan sampah ditinjau dari karakteristik dan masalah lingkungan sehingga dapat mencapai keberlanjutan lingkungan menuju masyarakat 5.0. Menurut Mc Naughton & Wolf, 2018) kebijakan lingkungan merupakan aspek fundamental dalam pengelolaan lingkungan dimana manusia dan hukum merupakan satu kesatuan dan mempunyai fungsi yang terintegrasi dalam menciptakan kehidupan dan memanfaatkan sumber daya alam dan lingkungan untuk keberlanjutan manusia. (Sekertariat Negara RI., 2009) Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup juga menjadi dasar dari berbagai kebijakan dalam rangka otonomi daerah seperti kebijakan Pemerintah Daerah Nomor 9 Tahun 2018 (Jabar, 2018) tentang pengelolaan sampah. Hal ini menjadi pandangan bahwa pengelolaan lingkungan yang berkaitan dengan sampah yang dihasilkan oleh suatu masyarakat memiliki nilai kesadaran masyarakat dan nilai pembangunan di suatu daerah. Program

BGC menjadi catatan dalam tata kelola kebijakan lingkungan dimana masyarakat memiliki keterikatan dan kesatuan dalam mencapai tujuan pengelolaan. Dalam hasil penelitian ini akan dipaparkan faktor-faktor yang mempengaruhi pelaksanaan suatu kebijakan dengan melihat tiga aspek yaitu karakteristik masalah pengelolaan, variabel lingkungan dan karakteristik kebijakan.

PEMBAHASAN

Pada bagian ini, analisis faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilan/kegagalan pelaksanaan program BGC terkait pengelolaan sampah menurut Mazmanian dan Sabatier dalam (Ariani dan Suwiteri, 2019). Faktor-faktor tersebut antara lain karakteristik masalah, karakteristik program/kebijakan, dan variabel lingkungan. Adapun penentu keberhasilan/tidak berhasilnya program BGC terkait pengelolaan sampah dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Karakteristik Masalah

Program BGC merupakan program pemberdayaan masyarakat untuk mengelola lingkungan secara mandiri tingkat Kota Bandung. Program BGC bertujuan untuk menciptakan perubahan sikap dan perilaku masyarakat Bandung dalam menangani lingkungan khususnya pengelolaan sampah, penghijauan dan kebiasaan hemat air (*water reception*). Program BGC berupaya memberikan pendidikan, pelatihan dan pendampingan serta implementasi pengelolaan lingkungan pada masyarakat Kota Bandung. Sasaran program BGC periode 2018-2021 adalah seluruh peserta BGC di 619 Perhimpunan Warga yang tersebar di 151 Kelurahan dan 30 Kecamatan (Wulandini & Sembiring, 2019). Dengan melibatkan seluruh komponen masyarakat, menunjukkan bahwa tingkat pluralitas kelompok sasaran program BGC terkait pengelolaan sampah sangat heterogen. Heterogen dilihat dari keragaman suku, agama, status sosial ekonomi, karakter, dan juga tingkat pendidikan (Fitriansyah, 2020) .

Mengenai ruang lingkup perubahan perilaku yang diharapkan, program yang bertujuan untuk memberikan pengetahuan atau sifat kognitif akan relatif lebih mudah

dilaksanakan daripada program yang bertujuan untuk mengubah sikap dan perilaku masyarakat Kota Bandung. Program BGC terkait pengelolaan sampah bertujuan untuk menciptakan perubahan perilaku masyarakat dalam pengelolaan sampah sehingga dapat mengurangi jumlah volume sampah yang dibuang ke tempat pembuangan sampah.

Hal ini menunjukkan bahwa tujuan pelaksanaan program BGC terkait pengelolaan sampah tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan pengetahuan masyarakat tentang manfaat pengelolaan sampah tetapi lebih menekankan pada perubahan perilaku masyarakat dalam mengelola sampah melalui pemilahan sampah, pengomposan, daur ulang sampah anorganik, dan adanya transaksi sampah anorganik/Bank Sampah sehingga dapat mengurangi jumlah volume sampah yang dibuang ke tempat pembuangan sampah.

Berdasarkan uraian di atas, maka karakteristik permasalahan program BGC terkait pengelolaan sampah dari pluralitas kelompok sasaran program dapat dikatakan sangat heterogen. Dengan melibatkan seluruh komponen masyarakat tanpa ada batasan baik dari tingkat pendidikan maupun status sosial ekonomi masyarakat membuat program pengelolaan sampah yang digulirkan cukup sulit untuk dilaksanakan. Heterogenitas kelompok sasaran suatu program akan mempengaruhi kemudahan pelaksanaan program di lapangan karena tingkat pemahaman anggota kelompok sasaran yang relatif beragam sehingga akan mempengaruhi pencapaian tujuan. dari program itu sendiri (Khairunisa & Safitri, 2020).

2. Karakteristik Program / Kebijakan

Program BGC merupakan program yang dibangun atas kerjasama pemerintah dengan Badan Pengelola Lingkungan Hidup Kota Bandung, Yayasan Unilever, Lembaga Penerapan Teknologi Tepat Guna, Media Pikiran Rakyat, Media Radio Rase FM, dan Tim Bina Kesejahteraan Keluarga Bandung. Membangun kemitraan diharapkan menjadi solusi yang tepat untuk mengatasi permasalahan implementasi kebijakan yang dianggap sulit dilakukan oleh pemerintah. Program BGC juga merupakan bukti komitmen seluruh mitra BGC sebagai wujud kerjasama BGC untuk turut serta menciptakan solusi permasalahan lingkungan khususnya sampah di Bandung (Ahmad & Sumiyati, 2018).

Hasil wawancara dengan informan bahwa semua mitra BGC memiliki peran dan kewenangan masing-masing. Dimana, dalam pelaksanaan semua peran tersebut harus dilaksanakan secara sinergis agar program-program BGC dapat dilaksanakan dengan baik di lapangan. Peran pemerintah (dalam hal ini Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup Kota Bandung) sebagai *stakeholder* dengan mengeluarkan kebijakan berupa program "Peningkatan Peran Partisipasi Masyarakat dalam Pengelolaan Sampah" salah satunya adalah program BGC. Bentuk dukungan lain dari pemerintah kota selain mengeluarkan kebijakan juga berupa penyediaan sarana dan prasarana bagi masyarakat dalam pengelolaan sampah, berupa pemilahan sampah organik dan anorganik, keranjang kompos, dan loket sampah (Hafidzah & Ainun, 2020).

Peran dan keterlibatan pemerintah yang kuat di setiap elemen terkait untuk memfasilitasi program BGC mampu membuat program BGC dapat diterima oleh masyarakat Bandung. Selain Dinas Lingkungan Hidup Kota Bandung, dinas/ instansi lain yang memberikan dukungan terhadap program BGC terkait pengelolaan sampah adalah PD Kebersihan, Dinas Pertanian, dan Dinas Pertamanan Kota Bandung (Ida, Pandanwangi, Manurung, & Ayuningtyas, 2021).

Selain komitmen dan peran Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup Kota Bandung, juga terdapat Lembaga Penerapan Teknologi Tepat Guna, Media Radio Rase FM, Harian Pikiran Rakyat. Lembaga Implementasi Teknologi Tepat Guna yang berperan dan berkomitmen sebagai mitra BGC juga sebagai fasilitator dengan tugas memberikan pendidikan dan pelatihan tentang program yang akan dilaksanakan sehingga masyarakat dapat memperoleh pendidikan dan pengetahuan tentang pengelolaan lingkungan khususnya pengelolaan sampah. Media Massa (Radio Rase FM dan Harian Pikiran Rakyat) sebagai media program dan informasi dari segala kegiatan dan kegiatan BGC kepada masyarakat. Melalui media massa, pesan untuk menyebarkan semangat agar setiap orang menjaga kebersihan lingkungan masing-masing bisa sampai ke masyarakat dari berbagai kalangan (Wulandini & Sembiring, 2019)

Integrasi dan komitmen yang kuat dari seluruh mitra BGC dalam pelaksanaan seluruh kegiatan program BGC khususnya pengelolaan sampah membuat program BGC dapat terlaksana

sesuai dengan maksud dan tujuan program. Kepedulian Pemerintah, swasta dan masyarakat bersatu untuk menciptakan lingkungan hijau yang bersih dan sehat telah terlihat dalam pelaksanaan program BGC selama periode 2018 hingga 2021. Mazmanian & Sabatier dalam Triningtias & Sugiyantio (2021) mengungkapkan keragaman instansi pelaksana program dapat dipandang sebagai modal sumber daya manusia yang harus dikelola sedemikian rupa sehingga dapat menjadi sisi positif dari pelaksanaan program. Tetapi ketika lembagsa-lembaga ini gagal untuk berintegrasi, itu hanya akan menjadi penghalang untuk implementasi yang efektif dan efisien (Hidayat, Fauzi, Harianja, & Saragih, 2019)

3. Variabel Lingkungan

Dukungan masyarakat dalam pelaksanaan program BGC terkait pengelolaan sampah berupa partisipasi masyarakat atau keterlibatan masyarakat dalam pelaksanaan kegiatan program. Berdasarkan wawancara dengan informan bahwa kunci sukses dari program BGC bukan hanya karena sinergi dan komitmen seluruh mitra BGC, tetapi yang lebih penting harus ada antusiasme dan partisipasi masyarakat yang tinggi dalam program BGC. Partisipasi masyarakat berperan penting dalam menentukan berhasil tidaknya program BGC terkait pengelolaan sampah. Partisipasi sebagai proses dimana semua pihak yang berkontribusi pada proses pembangunan juga mengarahkan dan mengelola proses pembangunan, serta keputusan dan sumber daya yang mempengaruhinya. Dengan partisipasi masyarakat dalam program pengelolaan sampah yang dilakukan oleh BGC mulai dari tahap perencanaan, tahap pelaksanaan dan tahap pemantauan program akan menjamin keberhasilan program.

Partisipasi masyarakat dalam pelaksanaan program-program BGC merupakan persatuan warga terkait pengelolaan sampah diwujudkan dalam berbagai bentuk kegiatan pelatihan yang diadakan oleh BGC. Fasilitator merupakan perwakilan dari perkumpulan warga dari masing-masing mitra BGC sebagai pendamping masyarakat dengan sistem Kader Lingkungan. Fasilitator biasanya adalah Ketua Himpunan Warga yang menjadi peserta lomba program BGC. Fasilitator telah dibekali dengan berbagai pelatihan kepemimpinan dan pengetahuan lingkungan khususnya pengelolaan sampah seperti pelatihan

pembuatan kompos, pelatihan Bank Sampah, pelatihan daur ulang sampah anorganik, dan pelatihan kampanye pembuatan kompos sampah, sehingga kegiatan pengelolaan sampah di masyarakat dapat terwujud walaupun dana yang digunakan dalam pelaksanaan program pengelolaan sampah berbasis masyarakat ini seluruhnya berasal dari swadaya masyarakat (Adhari, Pratama, & Halomoan, 2020). Bentuk partisipasi lain yang diberikan masyarakat dalam pelaksanaan kegiatan program BGC terkait pengelolaan sampah berdasarkan data kuesioner menunjukkan 33,7% berupa personel dan material, (21,7%) berupa personel, uang dan material, (21,7%) berupa tenaga/uang/keahlian/materi, dan (8,4%) berupa uang dan material. Pelibatan masyarakat secara penuh terhadap seluruh kegiatan program BGC yang terkait dengan pengelolaan 3R (*reduce, reuse, dan recycle*) seperti pemilahan sampah, pengomposan, daur ulang sampah anorganik bahkan hingga bank sampah menjadi ciri bahwa kegiatan tersebut memberikan manfaat yang besar bagi masyarakat. Masyarakat menilai, dengan mengikuti kegiatan program BGC terkait pengelolaan sampah akan mengubah kualitas lingkungan di lingkungan perkumpulan warganya menjadi lebih baik, selain itu juga akan memiliki sumber pendapatan baru. Perencanaan kegiatan cukup partisipatif ditunjukkan dengan melibatkan masyarakat untuk mengidentifikasi masalah dan kebutuhan sehingga program yang dilaksanakan sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik masyarakat (Sudarmadji, Darmanto, Widyastuti, & Lestari, 2016). Namun, terbatasnya pelibatan masyarakat dalam proses evaluasi program dapat berdampak pada tidak efektifnya manfaat dari kegiatan yang telah dilaksanakan sehingga mengakibatkan rendahnya rasa memiliki masyarakat.

Dalam penelitian ini, terdapat dua wilayah Rukun Tetangga yang diamati dalam proses pengamatan dan pengukuran keberhasilan program, Adapun pada kajian ini penelitian diarahkan untuk menggali kondisi yang terjadi pada RW 014 dan RW 08 yang ada pada Kecamatan Cikutra Kota Bandung. Berikut merupakan gambaran terkait lokasi penelitian yang diamati dari tingkat dan faktor keberhasilan program.

a. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Keberhasilan Pengelolaan Sampah Rumah Tangga.

Faktor-faktor yang mempengaruhi pengelolaan sampah di RW 14 Kelurahan Tamansari. Pelaksanaan pengelolaan sampah rumah tangga di RW 14 Kelurahan Tamansari Kota Bandung menunjukkan bahwa tingkat pelaksanaannya sangat tinggi dan dinilai berhasil. Hal ini ditunjukkan dengan pencapaian indikator-indikator keberhasilan kegiatan pengelolaan sampah dengan baik dan berkelanjutan seperti terjadinya kegiatan pemilahan sampah, terjadinya aktivitas pengomposan, adanya bank sampah/transaksi sampah anorganik serta telah terjadinya reduksi jumlah volume sampah yang dibuang ke TPS.

Keberhasilan pengelolaan sampah di RW 14 Kelurahan Tamansari dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut.

1) Faktor masyarakat.

Faktor masyarakat yang dikaji dalam penelitian ini adalah partisipasi warga dalam kegiatan program pengelolaan sampah di RW 14 Kelurahan Tamansari. Berdasarkan hasil wawancara dengan informan bahwa kunci sukses berjalannya program pengelolaan sampah adalah harus adanya antusiasme dan partisipasi masyarakat yang tinggi terhadap pelaksanaan program pengelolaan sampah di masyarakat. Sebesar 68,8% responden terlibat dalam pelaksanaan kegiatan pengelolaan sampah di RW 14 Kelurahan Tamansari dan 70,5% responden masih melakukan kegiatan pengelolaan sampah sampai sekarang. Jenis kegiatan pengelolaan sampah yang dilakukan, sebesar 42,2% melakukan pengomposan, 25% membuat kerajinan dari sampah, 68,8% responden menjadi nasabah aktif Bank Sampah RW 14 Kelurahan Tamansari. Partisipasi lain dari warga RW 14 Kelurahan Tamansari dalam pengelolaan sampah ditunjukkan pula dalam pembayaran rutin iuran kebersihan untuk PD Kebersihan juga iuran-iuran yang telah ditetapkan bersama dengan pengurus RW, sebesar 90% warga telah membayar iuran-iuran tersebut dan sebesar 64,1% warga selalu mengikuti kegiatan kerja bakti yang rutin dilaksanakan di RW 14 Kelurahan Tamansari.

2) Faktor sampah.

Di dalam pengkajian sistem pengelolaan sampah, jenis

sampah merupakan faktor yang terpenting dalam pemilihan sistem maupun teknologi yang digunakan. Berdasarkan hasil penimbangan sampah di RW 14 Kelurahan Tamansari diperoleh bahwa berdasarkan komposisinya lebih banyak jenis sampah organik dibandingkan dengan jenis sampah anorganik dengan perbandingan masing-masing 64,63% dan 35, 43%. Pada awalnya pengelolaan sampah di RW 14 masih konvensional, dan sampah langsung dibuang sendiri oleh warga ke TPS. Pada tahun 2020, pengurus RW bekerjasama dengan pihak ITB membuat insinerator dan sampah mulai diangkut oleh petugas sampah dari rumah warga ke TPS. Penggunaan teknologi insinerator dihentikan pada akhir 2019, karena menimbulkan dampak buruk bagi lingkungan juga kesehatan.

Pengurus RW berusaha untuk terus melakukan inovasi dengan membuat biopori yang bisa digunakan berkali-kali sebagai komposter, dan mudah dalam pengambilan komposnya. Sejak tahun 2020 biopori hasil inovasi pengurus itu pun dibuat dan disebarkan ke warga. Takakura mulai dibagikan ke warga, sampah organik dari rumah tangga berupa sisa makanan seperti nasi, potongan sayuran seperti kangkung, bayam, dan kulit buah-buahan diolah dalam komposter Takakura. Penggunaan Takakura sangat mudah dan tidak menimbulkan bau. Penggunaan biopori dan Takakura untuk pengomposan dipandang sangat praktis dan ramah lingkungan. Kegiatan pengomposan melalui Takakura dan biopori, pembuatan kerajinan/ daur ulang sampah anorganik juga Bank Sampah telah menyebabkan terjadinya reduksi jumlah volume sampah yang dibuang ke TPS. Sebesar 68% sampah di RW 14 Kelurahan Tamansari berdasarkan sampling sudah terkelola. 37% sampah anorganik masuk ke Bank Sampah, sebesar 31% sampah dapur (organik) untuk takakura. 32% sisanya dibuang ke tempat pembuangan sementara (TPS). Pemilihan faktor teknologi dalam pengelolaan sampah akan berpengaruh terhadap munculnya partisipasi warga dalam pengelolaan sampah. Teknologi memudahkan manusia dalam mengelola sesuatu, termasuk dalam pengelolaan sampah Selain alat yang dipergunakan

untuk mengolah sampah, cara pengelolaan sampah yang mudah juga akan berpengaruh terhadap partisipasi warga dalam pengelolaan sampah (Alfian, 2021).

3) Faktor organisasi atau manajemen.
Faktor ini merupakan faktor untuk meningkatkan daya guna dan hasil guna dari sistem pengelolaan sampah. Dengan organisasi dan manajemen yang tepat, maka keterpaduan pengumpulan dan pengangkutan yang mempergunakan sarana yang ada akan dapat dicapai seoptimal mungkin sebaliknya jika organisasi dan manajemennya kurang baik, maka hasil yang optimal dari pengumpulan dan pengangkutan sampah yang mempergunakan sarana yang ada, tidak akan tercapai. Lembaga pengelolaan sampah di RW 14 Kelurahan Tamansari dipusatkan di RW, dari mulai peraturan, iuran pengelolaan sampah, pengangkatan kader lingkungan, jadwal kebersihan, dan penyediaan sarana dan prasarana. Metode pelaksanaan maupun aturan pengelolaan sampah di RW 14 Kelurahan Tamansari merupakan hasil musyawarah antara pengurus RW dan jajarannya seperti RT, PKK, Desa Wisma, DKM, Karang Taruna, dan Anggota Linmas. Sarana dan prasarana pengelolaan sampah yang disediakan oleh pengurus RW 14 Kelurahan Tamansari berupa tempat sampah terpisah organik dan anorganik di setiap RT, tempat sampah kecil yang terbuat dari kaleng bekas di setiap gang, komposter takakura, biopori, TPS (bak sampah komunal), gerobak mini untuk mengangkut sampah, memfasilitasi pelatihan-pelatihan pengelolaan sampah untuk warga dan dibentuknya bank sampah untuk menampung sampah anorganik dari warga dan petugas sampah.

4) Faktor ekonomi/pembiayaan.
Sumber dana untuk pembiayaan kegiatan pengelolaan sampah (Khairunisa & Safitri, 2020), warga tidak dibebani oleh iuran pengelolaan sampah yang besar, iuran sampah yang dikenakan hanya sebesar Rp. 2.500/bulan/KK. Pengurus RW berusaha untuk mencari dana dari luar dan memanfaatkan sumberdaya ekonomi yang ada di lingkungan RW 14, seperti dengan menyewakan toko, bekerjasama dengan para pemilik sewa kamar, dan juga bekerjasama dengan pihak luar seperti PDAM, PD Kebersihan, Dinas Pertamanan dan Pemakaman,

Walikota, dan BPLH Kota Bandung. Pengurus RW 14 Kelurahan Tamansari telah berhasil membangun sarana dan prasarana lingkungan hidup khususnya berkenaan dengan pengelolaan sampah. Pendanaan yang dibutuhkan sekarang adalah untuk biaya operasional pengelolaan dan pemeliharaan sarana dan prasarana yang telah ada agar berkelanjutan, seperti pemeliharaan takakura, biopori, dan biaya operasional sampah di lingkungan.

Pelaksanaan kegiatan untuk perubahan berkaitan erat dengan pendanaan/pembiayaan. Dana sifatnya jangka untuk berlangsungnya program. Pelaku perubahan sebagai perantara yang menghubungkan masyarakat dengan lembaga penyandang dana yang mengajarkan masyarakat untuk mendapatkan dana dengan melibatkan mereka dalam proses pembuatan kegiatan. Pembiayaan operasional untuk bank sampah sepenuhnya menjadi tanggung jawab pengelola bank sampah.

Pengelola bank sampah telah berhasil mengelola pendapatannya sehingga bisa mandiri. Pendapat-an yang diperoleh dari bulan Juli 2011 sampai Desember 2013 adalah sebesar Rp 1.595.012 sesudah dikurangi biaya operasional.

5) Faktor hukum/peraturan.

Peraturan mengenai pengelolaan sampah di masyarakat yang ada di RW 14 Kelurahan Tamansari, terbentuk dari hasil rapat/musyawarah RW/RT. Peraturan tersebut bukan bersumber dari pihak luar seperti dari kelurahan ataupun kecamatan. Peraturan terkait pengelolaan sampah di RW 14 Kelurahan Tamansari meliputi: a) Ketentuan organisasi pengelola Dalam pelaksanaan sampah berbasis masyarakat, pengurus RW 14 Kelurahan Tamansari telah mengeluarkan beberapa surat keputusan untuk memperlancar pelaksanaan pengelolaan sampah di masyarakat. Surat Keputusan yang dibuat, seperti tata tertib kebersihan lingkungan dan pengelolaan sampah, keputusan mengenai iuran pengelolaan sampah, dan terakhir keputusan mendirikan bank sampah. Pengurus RT diminta untuk membantu mengawasi jalannya pelaksanaan pengelolaan sampah di masyarakat dan menarik iuran kepada masyarakat. b) Tata laksana kerja

Bank sampah RW 14 Kelurahan Tamansari telah memiliki tata laksana kerja seperti buka setiap hari Selasa dari jam 10.00 – 12.00. Telah memiliki prosedur pengelolaan bank sampah dan telah beroperasi dari tahun 2011 sampai sekarang. c) Ketentuan teknis pengelolaan sampah terpadu berbasis masyarakat. RW meminta warga untuk melakukan pemilahan dan pewadahan sampah organik dan anorganik. Memisahkan kedua jenis sampah tersebut dalam dua plastik yang berbeda. Bagi warga yang memiliki komposter Takakura bisa mengelola sampah organik menjadi kompos, bila tidak memiliki bisa mengelolanya di biopori. Untuk sampah anorganik, bisa diolah menjadi kerajinan atau dijual ke bank sampah. Residu pengolahan sampah organik dan anorganik tersebut dimasukkan kembali ke dalam plastik secara terpisah untuk dikumpulkan dan diangkut oleh petugas sampah pada sore hari.

b. Faktor-faktor yang mempengaruhi pengelolaan sampah di RW 08 Kelurahan Cikutra

1) Faktor masyarakat.
Sebesar 62,2% responden tidak terlibat dalam pelaksanaan kegiatan pengelolaan sampah di RW 08 Kelurahan Cikutra dan 75,9% responden sudah tidak lagi melakukan kegiatan pengelolaan sampah dan 87,3% responden langsung membuang sampah yang dihasilkannya ke TPS. Meskipun sebesar 34,2% responden sudah pernah mendengar dan mengetahui pengelolaan sampah dengan konsep 3R dan 31,6% responden pernah menjadi anggota Bank Sampah RW 08 Kelurahan Cikutra. Kurangnya partisipasi warga RW 08 Kelurahan Cikutra dalam pengelolaan sampah ditunjukkan pula dalam pembayaran rutin iuran kebersihan yang telah ditetapkan bersama dengan pengurus RW. Sebesar 62,2% responden telah membayar iuran-iuran tersebut dan sebesar 68,4% responden kadang-kadang mengikuti kegiatan kerja bakti yang rutin dilaksanakan di RW 08 Kelurahan Cikutra.

2) Faktor sampah.
Berdasarkan hasil penimbangan sampah di RW 08 Kelurahan Cikutra diperoleh bahwa berdasarkan

komposisinya lebih banyak jenis sampah organik dibandingkan dengan jenis sampah anorganik dengan perbandingan masing-masing 61.22% dan 39,66%. Kondisi ini tidak berbeda dengan hasil penimbangan sampah di RW 14 Kelurahan Tamansari, dimana jenis sampah organik lebih banyak dibandingkan jenis sampah anorganik (Febiana, 2019). Di dalam pengkajian sistem pengelolaan sampah, jenis sampah merupakan faktor yang terpenting dalam pemilihan sistem maupun teknologi yang digunakan.

Pada tahun 2009 saat RW 08 Kelurahan Cikutra mengikuti lomba BGC, pelaksanaan kegiatan pengelolaan sampah mulai dari memilah sampah, pengomposan, dan daur ulang sampah anorganik berjalan cukup baik bahkan telah menghantarkan kami masuk menjadi sepuluh besar dan menjadi juara harapan 3 pada tahun 2020. Namun, saat ini tidak ada kegiatan pengelolaan sampah di RW 08 Kelurahan Cikutra, warga hanya mengumpulkan sampah selanjutnya diangkut oleh petugas sampah untuk dibuang ke TPS. Tidak ada penggunaan alat atau teknologi apa pun untuk mengolah sampah organik dan sampah anorganik yang dihasilkan.

3) Faktor organisasi atau manajemen.

Pengelolaan sampah/kebersihan lingkungan di RW 08 Kelurahan Cikutra masih berjalan di bawah kepengurusan RW dan tidak ada kelembagaan khusus untuk pengelolaan sampah. Pengurus RW akan bertanggung jawab atas sistem pengangkutan, penyediaan sarana dan prasarana sampah, serta memfasilitasi sistem pembayaran petugas kebersihan. Sedangkan pengurus RT bertugas mengumpulkan iuran dari masyarakat.

Menurut Pusic (Wati, Rizqi, Iqbal, Langi, & Putri, 2021) mensyaratkan bahwa partisipasi maksimal hanya bisa dilakukan dengan memperhatikan dua hal mendasar. Pertama, struktur kelembagaan yang memungkinkan warga untuk berpartisipasi dan memutuskan persoalan mereka sendiri. Kedua; representasi masyarakat yang terwakili secara proporsional di dalam setiap proses pengambilan kebijakan yang mengatasnamakan kepentingan bersama. Sarana dan prasarana pengelolaan

sampah yang disediakan oleh pengurus RW 08 Kelurahan Cikutra berupa tempat sampah terpisah organik dan anorganik sumbangan dari PD Kebersihan Kota Bandung. Dua buah roda pengangkut sampah, dan gedung untuk Bank Sampah yang mulai beroperasi pada tanggal 25 Juni 2014. Sedangkan untuk TPS, RW kami tidak memiliki TPS sendiri, sampah dari rumah warga diangkut oleh petugas sampah ke TPS yang berada di RW 13 Kelurahan Cikutra.

4) Faktor ekonomi/pembiayaan.
Iuran sampah warga dikenakan sebesar Rp. 6.000/bulan/KK. Tidak ada pencarian dana tambahan yang dilakukan pengurus RW untuk mencari pembiayaan kegiatan pengelolaan lingkungan khususnya pengelolaan sampah di RW 08 Kelurahan Cikutra. Alokasi iuran dari warga dipergunakan selain untuk biaya operasional sampah seperti biaya untuk petugas sampah juga dialokasikan untuk PKK, Karang Taruna, dan keamanan. Faktor pembiayaan menjadi faktor penghambat pelaksanaan pengelolaan sampah di RW 08 Kelurahan Cikutra. Tidak adanya suntikan dana dari pihak luar yang dapat dikelola sendiri oleh warga masyarakat melalui kader-kader lingkungan di awal program, sebagai contoh, berupa koperasi atau suatu pengelolaan keuangan bersama yang dapat menjamin keberlanjutan. Pendanaan digunakan untuk mempercepat penerimaan masyarakat terhadap cara baru pengelolaan sampah berbasis masyarakat.

5) Faktor Hukum/Peraturan Tidak ada peraturan yang dibuat ataupun dikeluarkan terkait dengan pengelolaan sampah di RW 08 Kelurahan Cikutra baik berkenaan dengan ketentuan organisasi pengelolaan sampah, tata laksana kerja maupun ketentuan teknis pengelolaan sampah terpadu seperti halnya peraturan pengelolaan sampah yang ada di RW 14 Kelurahan Tamansari. Kegiatan pengelolaan sampah berbasis masyarakat melalui konsep 3R dapat terlaksana apabila mendapat perhatian dan pengelolaan yang sungguh-sungguh oleh pemerintah dan dinas terkait melalui suatu kebijakan berupa hukum yang mengikat dan dilaksanakan secara konsisten.

c. Variabel Lingkungan

Dukungan publik terhadap sebuah program BGC terkait pengelolaan sampah Dukungan publik merupakan salah satu dari faktor di luar kebijakan yang mempengaruhi keefektifan implementasi program BGC terkait pengelolaan sampah. Menurut Mazmanian dan Sabatier dalam Sa'diya, Purnomo, & Kasiwi (2020) *"Hakekat perhatian publik yang bersifat sesaat menimbulkan kesukaran-kesukaran tertentu, karena untuk mendorong kesukaran-kesukaran tertentu, karena untuk mendorong tingkat keberhasilan suatu implementasi kebijakan sangat dibutuhkan adanya sentuhan dukungan dari warga. Karena itu, mekanisme partisipasi publik sangat penting artinya dalam proses pelaksanaan kebijakan publik di lapangan.".* Dukungan publik dalam pelaksanaan program BGC terkait pengelolaan sampah yakni berupa partisipasi masyarakat atau keterlibatan masyarakat dalam pelaksanaan kegiatan program. Berdasarkan hasil wawancara dengan informan bahwa kunci sukses berjalannya program BGC, bukan hanya karena terbangunnya sinergi serta komitmen dari seluruh mitra BGC, akan tetapi yang lebih penting lagi adalah harus adanya antusiasme dan partisipasi masyarakat yang tinggi terhadap program BGC. Partisipasi masyarakat memegang peranan penting dalam menentukan keberhasilan atau kegagalan program BGC terkait pengelolaan sampah. Rietbergen, McCracken, dan Narayanan dalam Yogaswara (2020) mendefinisikan partisipasi sebagai suatu proses dimana semua pihak yang memegang andil dalam proses pembangunan ikut mengarahkan dan mengatur proses pengembangan, serta keputusan-keputusan dan sumber daya yang mempengaruhinya.

Dengan adanya partisipasi masyarakat dalam program pengelolaan sampah yang dilakukan oleh pihak BGC mulai dari tahap perencanaan, tahap pelaksanaan program serta tahap pemanfaatan program akan menjamin keberhasilan program tersebut. Adanya partisipasi masyarakat juga akan membuat masyarakat akan lebih mempercayai suatu proyek atau program jika merasa dilibatkan dalam setiap proses. Karena mereka lebih mengetahui seluk beluk proyek tersebut, selain itu partisipasi masyarakat juga dianggap sebagai hak demokrasi dalam pembangunan masyarakat itu sendiri (Sutrisno dalam Fenti, 2020). Berikut disajikan data partisipasi masyarakat dalam kegiatan BGC terkait pengelolaan sampah.

Tabel 1. Keterlibatan Masyarakat Dalam Perencanaan Program BGC Terkait Pengelolaan Sampah (n=83)

No	Keterlibatan Masyarakat Dalam Perencanaan Program BGC Terkait Pengelolaan Sampah	Jumlah Fasilitator	Persentase (%)
1	Terlibat	49	59
2	Tidak Terlibat	34	41
Jumlah		83	100

Tabel 2. Keterlibatan Masyarakat Dalam Pelaksanaan Program BGC Terkait Pengelolaan Sampah (n= 83)

No	Keterlibatan Masyarakat Dalam Pelaksanaan Program BGC Terkait Pengelolaan Sampah	Jumlah Fasilitator	Persentase (%)
1	Terlibat	81	97,6
2	Tidak Terlibat	2	2,4
Jumlah		83	100

Tabel 3. Keterlibatan Masyarakat Dalam Evaluasi Program BGC Terkait Pengelolaan Sampah (n= 83)

No	Keterlibatan Masyarakat Dalam Evaluasi Program BGC Terkait Pengelolaan Sampah	Jumlah Fasilitator	Persentase (%)
1	Terlibat	24	28,9
2	Tidak Terlibat	59	71,1
Jumlah		83	100

Berdasarkan data survei, diketahui bahwa partisipasi masyarakat terhadap tahapan kegiatan program BGC terkait pengelolaan sampah memiliki persentase keterlibatan yang berbeda-beda. Pada tahap perencanaan memiliki nilai persentase sebesar 59%, tahap pelaksanaan memiliki nilai persentase keterlibatan sebesar (97,6%) sedangkan pada tahap evaluasi program memiliki nilai persentase keterlibatan sebesar (28,9%). Perbedaan nilai persentase keterlibatan masyarakat tersebut disebabkan oleh kesadaran masyarakat bahwa pada tahap pelaksanaan program BGC terkait pengelolaan sampah, mereka akan langsung merasakan dampak yang ditimbulkan tetkala mereka mengikutinya. Pada tahap perencanaan, karena kesibukan pekerjaan mereka beranggapan bahwa kegiatan tersebut dapat diwakilkan pada tokoh masyarakat yang lain dan aparat desa ataupun kecamatan. Sedangkan pada tahap evaluasi program BGC terkait pengelolaan sampah, berdasarkan hasil wawancara dengan informan kunci bahwa kegiatan evaluasi program BGC khusus dihadiri oleh perwakilan 6 (enam) mitra BGC tanpa dihadiri perwakilan dari masyarakat. Padahal keterlibatan/partisipasi masyarakat dalam kegiatan evaluasi program merupakan hal yang penting, karena partisipasi masyarakat pada tahap ini dianggap sebagai umpan balik yang dapat memberi masukan demi perbaikan pelaksanaan proyek selanjutnya.

Keterlibatan masyarakat dalam perencanaan diwujudkan dengan menghadiri undangan untuk mengikuti rapat dan memberikan masukan dalam menentukan program yang akan digulirkan. Berdasarkan hasil survei, diketahui bahwa jenis partisipasi yang diberikan masyarakat dalam menghadiri dan mengikuti rapat yang diselenggarakan menunjukkan (78,3%) jenis partisipasi aktif dengan memberikan saran dan usulan dan (21,7%) jenis partisipasi pasif. LPTT sebagai pengelola program BGC melibatkan masyarakat dengan tujuan untuk membangun pemberdayaan masyarakat, terbangunnya pemberdayaan dimasyarakat merupakan salah satu faktor yang mendorong masyarakat banyak terlibat dalam program yang digulirkan. Untuk tahapan perencanaan kegiatan dapat dikatakan sudah cukup partisipatif yang ditunjukkan dengan melibatkan masyarakat untuk melakukan identifikasi masalah dan kebutuhannya sehingga program yang dilaksanakan sesuai

dengan kebutuhan dan karakteristik masyarakat setempat. Dalam hal ini terdapat kesadaran untuk memperhatikan aspek-aspek lokalitas (*local wisdom)* sehingga ada kontribusi masyarakat pada saat perencanaan kegiatan.

Partisipasi masyarakat dalam pelaksanaan program BGC terkait pengelolaan sampah diwujudkan dalam berbagai bentuk kegiatan pelatihan-pelatihan yang diselenggarakan pihak BGC. Fasilitator merupakan perwakilan dari RW masing-masing peserta BGC sebagai pendamping komunitas dengan sistem Kader Lingkungan. Fasilitator biasanya adalah Ketua RW peserta lomba program BGC. Fasilitator tersebut telah dibekali dengan berbagai pelatihan tentang kepemimpinan dan pengetahuan lingkungan khususnya pengelolaan sampah seperti pelatihan pengomposan, pelatihan bank sampah, pelatihan daur ulang sampah anorganik/*transion,* dan pelatihan kampanye sahabat sampah; dengan demikian, kegiatan pengelolaan sampah di masyarakatpun dapat terwujud meskipun dana yang dipergunakan dalam pelaksanaan program pengelolaan sampah dimasyarakat sepenuhnya berasal dari swadaya masyarakat.

Bentuk partisipasi lain yang diberikan masyarakat dalam pelaksanaan kegiatan program BGC terkait pengelolaan sampah berdasarkan hasil data kuesioner menunjukkan (33,7%) berupa tenaga dan material, (21,7%) berupa tenaga, uang dan material, (21,7%) berupa tenaga/uang/keahlian/ material, dan (8,4%) berupa uang dan material. Keterlibatan masyarakat secara penuh terhadap semua kegiatan program BGC terkait pengelolaan dengan prinsip 3R (*reduce, reuse dan recycling*) seperti melakukan pemilahan sampah, melakukan pengomposan, melakukan daur ulang sampah anorganik bahkan sampai bank sampah mencirikan bahwa kegiatan tersebut memberikan manfaat besar bagi masyarakat. Masyarakat menganggap bahwa dengan mengikuti kegiatan program BGC terkait pengelolaan sampah akan mengubah kualitas lingkungan hidup di RW nya menjadi lebih baik selain itu mereka juga akan mempunyai sumber pendapatan baru. Untuk perencanaan kegiatan dapat dikatakan sudah cukup partisipatif ditunjukkan dengan melibatkan masyarakat untuk melakukan identifikasi masalah dan kebutuhannya sehingga

program yang dilaksanakan sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik masyarakat di lapangan. Namun terbatasnya keterlibatan masyarakat dalam proses evaluasi program dapat berdampak pada tidak optimalnya manfaat kegiatan yang telah dilaksanakan sehingga mengakibatkan rendahnya rasa memiliki dari masyarakat.

Berdasarkan uraian di atas, maka dapat diketahui faktor pendorong terhadap keberhasilan program BGC terkait pengelolaan sampah adalah dengan terbangunnya sinergi serta komitmen yang kuat dari seluruh mitra BGC di setiap elemen yang terkait untuk memfasilitasi program BGC di masyarakat serta adanya antusiasme dan partisipasi masyarakat yang tinggi terhadap program BGC. Sedangkan faktor penghambat terhadap keberhasilan pelaksanaan program BGC terkait pengelolaan sampah adalah dengan melibatkan seluruh komponen masyarakat serta tidak adanya batasan dari kelompok sasaran program BGC menyebabkan beragamnya pemahaman yang dimiliki masyarakat, sehingga menjadikan sulitnya implementasi program pengelolaan sampah di masyarakat.

KESIMPULAN

Keberhasilan program BGC terkait pengelolaan sampah juga ditunjukkan oleh hasil penelitian pada dua Rukun Warga di Kota Bandung yaitu RW 14 Kelurahan Tamansari dan RW 08 Kelurahan Cikutra. Program BGC terkait pengelolaan sampah dikatakan berhasil di RW 14 Kelurahan Tamansari karena terdapat kegiatan pengelolaan sampah yang beragam diantaranya adalah pengomposan untuk sampah organik melalui takakura dan biopori, daur ulang sampah anorganik melalui pembuatan kerajinan berbahan dasar plastik, *urban farming*, dan Bank Sampah. Kegiatan pengelolaan sampah menyebabkan terjadinya reduksi volume sampah yang dibuang ke TPS karena sebesar (68%) sampah di RW 14 Kelurahan Tamansari berdasarkan sampling sudah terkelola, (37%) sampah anorganik masuk ke Bank Sampah, (31%) sampah dapur (organik) untuk Takakura dan (32%) sisanya dibuang ke tempat pembuangan sementara (TPS). Terjadi peningkatan ekonomi masyarakat dari kegiatan pengomposan, kegiatan daur ulang sampah anorganik

dan dari adanya Bank Sampah, tercatat pengelola Bank Sampah RW 14 Kelurahan Tamansari dapat memperoleh pendapatan sebesar Rp 1.595.012 dari bulan Juli 2011 sampai Desember 2013.

Program BGC terkait pengelolaan sampah yang masih harus ditingkatkan terjadi di RW 08 Kelurahan Cikutra karena sejak Tahun 2019 sampai sekarang tidak ada jenis kegiatan pengelolaan sampah apa pun yang dilakukan. Namun pada tanggal 25 Juni 2019 Bank Sampah RW 08 Kelurahan Cikutra mulai dioperasikan kembali dan diresmikan pada tanggal 13 Agustus 2019. Manfaat atau dampak dari pengelolaan sampah baik pada aspek lingkungan, sosial maupun ekonomi di RW 08 Kelurahan Cikutra hanya dirasakan warga pada saat RW tersebut menjadi peserta BGC pada tahun 2019-2020.

Faktor-faktor pendorong terhadap pencapaian keberhasilan pengelolaan sampah di RW 14 Kelurahan Tamansari meliputi tingginya tingkat partisipasi masyarakat, sarana dan prasarana yang mendukung, pendanaan, manajemen serta faktor peraturan yang dibuat, dan diberlakukan pada warga terkait pengelolaan sampah. Di RW 08 Kelurahan Cikutra, rendahnya tingkat partisipasi warga, kurangnya sarana dan prasarana, tidak adanya sumber dana lain, dan tidak adanya peraturan tertulis maupun tidak tertulis terkait pengelolaan sampah. Faktor-faktor tersebut di atas menjadi kendala yang harus dicarikan strategi dalam pelaksanaannya di lapangan. Berdasarkan dampak tersebut menunjukkan bahwa pelaksanaan program BGC terkait pengelolaan sampah dapat dikatakan memiliki dampak lingkungan pada warga perhimpunan peserta BGC yaitu lingkungan menjadi lebih nyaman, bersih, hijau dan asri. Aspek sosial berdampak pada interaksi di masyarakat tentang peduli lingkungan, seperti kegiatan gotong royong. Aspek ekonomi dari kegiatan pengomposan, daur ulang dan keberadaan Bank Sampah telah membantu meningkatkan perekonomian warga di warga peserta perhimpunan BGC. Berdasarkan efisiensi, dari sisi biaya yang digunakan dalam pelaksanaan program BGC, pengelolaan sampah periode tahun 2020 dapat dikatakan lebih efisien dibandingkan tahun 2021. Berdasarkan keberlanjutan, menunjukkan bahwa keberlanjutan program pengelolaan sampah di masyarakat (60,2%) masih menjalankan kegiatan program pengelolaan sampah dan (39,8%) belum menjalankan

program pengelolaan sampah karena perubahan kepengurusan perhimpunan warga serta kurangnya partisipasi dari warga yang disebabkan oleh kesibukan pekerjaan para warga dan sebagainya.

Faktor pendukung keberhasilan pencapaian program BGC terkait pengelolaan sampah antara lain terjalinnya sinergi dan komitmen yang kuat dari seluruh mitra BGC di setiap elemen terkait untuk memfasilitasi program BGC di masyarakat serta antusiasme dan partisipasi masyarakat yang tinggi terhadap program BGC. Namun demikian, heterogenitas kelompok sasaran program BGC masih menjadi kendala yang harus dicari strategi dalam implementasinya di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

Adhari, L., Pratama, Y., & Halomoan, N. (2020). Pemilihan Daerah Pelayanan Sampah di Bandung Utara Berdasarkan Parameter Daerah Prioritas SNI-19-2454-2002. *Jurnal Serambi Engineering*, *5*(4), 1391–1397. https://doi.org/10.32672/jse.v5i4.2333

Agustina, E., Senditya Gewe, R., Made Wahyu Widyarsana, dan I., (2020). Studi Rekayasa Infrastruktur Lingkungan, P., Teknik Sipil dan Lingkungan, F., Teknologi Bandung, I., & Perumahan Rakyat Kawasan Permukiman dan Pertanahan Provinsi Sumatera Barat, D. Evaluasi Sistem Pengelolaan Sampah Di Kawasan Perumahan Di Kota Bandung Evaluation of Solid Waste Management System in Bandung City Real Estate. *Jurnal Teknik Lingkungan*, *26*, 89–102.

Ahmad, R., & Sumiyati, Y. (2018). *Kewajiban Pemilahan Sampah Di Kota Bandung Berdasarkan Perda Kota Bandung Nomor 9 Tahun 2018 Tentang Pengelolaan Sampah Dan Implementasi Dalam Pemilahan Sampah Di Daerah Cihapit Kecamatan Bandung Wetan Berdasarakan Uu Nomor 18 Tahun 2008 Tentang Pengelola*. 142–144. http://103.78.195.33/handle/123456789/28332

Alfian, R. (2021). *Evaluasi Efektivitas Sistem Pengangkutan dan Pengelolaan Sampah di TPA Sarimukti Kota Bandung*. *02*(01), 16–23.

Ariani., T.M., & Suwitri, S. (2019). Implementasi Kebijakan Peraturan Walikota Tegal No. 6 Tahun 2013 Tentang Penyelenggaraan Pelayanan Informasi Publik di Lingkungan Pemerintah Kota Tegal. *Jurnal Adminsitrasl, Universitas Diponegoro*, *1*(6), 81–109.

Febiana, R. M. R. M. (2019). *Implementasi Peraturan Daerah Kabupaten Bandung Nomor 15 Tahun 2012 Tentang Pengelolaan Sampah (Studi Kasus Pengelolaan Sampah oleh Dinas Lingkungan Hidup di Kecamatan Bojongsoang, Kabupaten Bandung)*. *3*(1), 114–124. http://ejournal.unibba.ac.id/index.php/jisipol/article/download/11/10/#pdfjs.action=download

Fenti, U. I. (2020). Penerapan Teknologi Pengelolaan Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak Untuk Mengatasi Masalah Sampah di Kota Bandung. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, *1*(2), 12.

Fitriansyah, H., Pirngadi, B. H., & Nurwulandari, F. S. (2020). Pengelolaan Persampahan Pada Permukiman Padat Penduduk Di Kelurahan Cicadas Kota Bandung. *Plano Madani*, *9*(1), 73–86.

Hafidzah, Y. R., & Ainun, S. (2020). Pengembangan Penentuan Daerah Prioritas Terhadap Sistem Pengelolaan Sampah Berdasarkan SNI 19-2454-2002 (Studi Kasus: Wilayah Pelayanan Bandung Selatan). *Jurnal Reka Lingkungan*, *9*(2), 119–131. https://doi.org/10.26760/rekalingkungan.v9i2.119-131

Hidayat, M. Y., Fauzi, R., Harianja, A. H., & Saragih, G. S. (2019). Efisiensi Penggunaan Grey Water dan Air Hujan dalam Rangka Menurunkan Tingkat Penggunaan Air Baku. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, *20*(2), 215. https://doi.org/10.29122/jtl.v20i2.3347

Ida, I., Pandanwangi, A., Manurung, R. T., & Ayuningtyas, N. (2021). Pendampingan Komunitas Masyarakat Sukajadi Dalam Mengedukasi Nilai Guna Sampah Menjadi Berkah. *Aksara: Jurnal Ilmu Pendidikan Nonformal*, *7*(3), 833. https://doi.org/10.37905/aksara.7.3.833-842.2021

Perda Jabar. (2018). *85_Perda No.9 th.2018.pdf* (p. 10).

Khairunisa, N. S., & Safitri, D. R. (2020). Integrasi Data Sampah Sebagai Upaya Mewujudkan Zero Waste Management: Studi Kasus Di Kota Bandung. *Jurnal Analisa Sosiologi*, *9*, 108–123. https://doi.org/10.20961/jas.v9i0.39829

Marwiyah. (2022). Kebijakan Pengelolaan Ruang Terbuka Hijau Di Kota Probolinggo. *Jurnal Lingkungan Dan Kebijakan*, *2*(8), 12–15.

McNaughton S.J. & Wolf, L.L. (2018). General Ecology. In B. Lowson (Ed.), (3rd ed., Vol. 1999, Issue December). Holt, Rinehart and Winston.

Sa'diyah, A. F., Purnomo, E. P., & Kasiwi, A. N. (2020). Waste Management in the Implementation of Smart City in Bogor City. *Jurnal Ilmu Pemerintahan Widya Praja*, *46*(1), 271–279. https://doi.org/10.33701/jipwp.v46i1.773

Sekertariat Negara RI. (2009). Undang-undang no. 32 Tahun 2009. In *Sekertariat Negara RI*.

Sudarmadji, S., Darmanto, D., Widyastuti, M., & Lestari, S. (2016). Pengelolaan Mata Air untuk Penyediaan Rumah Tangga Berkelanjutan di Lereng Selatan Gunungapi Merapi. *Jurnal Manusia Dan Lingkungan*, *23*(1), 102.

Triningtias, A., & Sugiyantio, E. (2021). Penerapan Kebijakan Kawasan Tanpa Rokok Di Taman Sempur Kota Bogor. *Jurnal Sosial Dan Humaniora*, *5*(9), 1. https://doi.org/10.47313/ppl.v5i9.833

Wati, F. R., Rizqi, A., M. Iqbal, M. I., Langi, S. S., & Putri, D. N. (2021). Efektivitas Kebijakan Pengelolaan Sampah Berbasis Tempat Pengelolaan Sampah Terpadu 3R di Indonesia. *Perspektif*, *10*(1), 195–203. https://doi.org/10.31289/perspektif.v10i1.4296

Wulandini, A., & Sembiring, E. (2019). Keberlanjutan Pengelolaan Sampah Mandiri Di RW 09 Kelurahan Cigereleng, Kota Bandung. *Jurnal Permukiman*, *14*(2), 92. https://doi.org/10.31815/jp.2019.14.92-103

Yogaswara, Y. (2020). Penentuan Rute Dan Penjadwalan Pengangkutan Sampah di Kota Bandung Wilayah Bandung Barat dengan Menggunakan Tabu Search. *Jurnal Media Teknik Dan Sistem Industri*, 4(1), 1. https://doi.org/10.35194/jmtsi.v4i1.844.

KEBUTUHAN KERETA API PENUMPANG PADA KORIDOR MANADO-BITUNG

THE NEED OF COMMUTER RAIL ON MANADO-BITUNG CORRIDOR

Farisa Maulinam Amo

Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Jurusan Teknik, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka

farisa@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Pemerintah pusat bekerja sama dengan pemerintah daerah merencanakan pembangunan jaringan kereta api (KA) Manado-Bitung untuk mengembangkan pusat pertumbuhan ekonomi berkelanjutan juga mendukung rencana pengembangan Kawasan Industri (KI) dan Kawasan Ekonomi Khusus (KEK). Pengembangan Jaringan KA oleh pemerintah yang akan menghubungkan kota Manado dan Kota Bitung tersebut dimaksudkan untuk melayani pergerakan yang timbul dari dambak pembangunan KEK Bitung dan Kawasan Pengembangan Ekonomi Terpadu (KAPET) Manado. Kedua kegiatan strategis nasional tersebut diperkirakan menjadi sumber demand penumpang angkutan kereta api nantinya sehingga perlu dikaji preferensi pengguna potensial terhadap bentuk pelayanan KA koridor Manado-Bitung, hubungan karakteristik dengan preferensi pengguna potensial terhadap atribut pelayanan KA, dan sensitivitas penggunaan angkutan KA oleh penumpang potensial. Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif dengan teknik stated preference, analisis yang digunakan adalah analisis distribusi frekuensi, tabulasi silang, uji Chi-Square, dan sensitivitas. Hasil menunjukkan atribut pelayanan KA yang menjadi preferensi dan mempengaruhi penggunaan KA oleh penumpang potensial adalah frekuensi keberangkatan KA <40 menit, dan waktu tempuh KA maksimal 105 menit. Sensitivitas penggunaan KA dipengaruhi oleh atribut frekuensi keberangkatan KA setiap 15 menit meningkatkan probabilitas sebesar 34%, 20 menit meningkat 25%, 30 menit meningkat 14%, dan 40 menit probabilitas penggunaan KA sebesar 11%. Apabila diberlakukan atribut waktu tempuh KA selama 45 menit meningkatkan penggunaan KA oleh

penumpang potensial sebesar 55%, 60 menit meningkatkan 45%, 90 menit meningkatkan 16%, dan probabilitas penggunaan KA dengan waktu tempuh 105 menit adalah sebesar 6%. Atribut lain yang secara signifikan mempengaruhi preferensi penumpang potensial adalah atribut biaya perjalanan dengan nominal tarif sebesar Rp 5.000.

Kata kunci: *kereta api komuter, penumpang potensial, preferensi.*

ABSTRACT

The central government in collaboration with local governments is planning the construction of the Manado-Bitung railway network to develop a center for sustainable economic growth as well as supporting plans for the development of Industrial Estates (IE) and Special Economic Zones (SEZ). The development of the railway network by the government that will connect the city of Manado and Bitung City is intended to serve the movements arising from the impact of the development of the Bitung SEZ and Manado's Integrated Economic Development Zone. The two national strategic activities are estimated to be a source of demand for rail transport passengers in the future, so it is necessary to study the preferences of potential users for the form of service for the Manado-Bitung Corridor, the relationship between characteristics and preferences of potential users on the attributes of train services, and the sensitivity of the use of rail transportation by potential passengers and comparisons potential users' preferences for government studies. This research is a descriptive study with stated preference techniques, the analysis used are frequency distribution analysis, cross tabulation, Chi-Square test, and sensitivity. The results show the train service attributes that become preferences and affect the use of trains by potential passengers are the frequency of train departures <40 minutes, and a maximum train travel time of 105 minutes. The sensitivity of the use of the train is influenced by the attribute. The frequency of train departures every 15 minutes increases the probability by 34%, 20 minutes increases by 25%, 30 minutes increases by 14% and 40 minutes the probability of using the train by 11%. If the attribute of train travel time for 45 minutes increases the use of trains by potential passengers by 55%, 60 minutes increases 45%, 90 minutes increases 16% and the probability of using trains with a travel time of 105 minutes is 6%. Another attribute that significantly affects the preferences of potential passengers is the attribute of travel costs with a nominal fare of Rp 5.000.

Keywords*: commuter rail, potential passenger, preference.*

PENDAHULUAN

Berdasarkan teori tempat sentral (*central place theory*) yang diformulasikan oleh Walter Christaller (1933) menyatakan bahwa dalam pengembangan wilayah terdapat tiga unsur fundamental, yaitu (a) adanya pusat-pusat, (b) memiliki wilayah pengaruh (wilayah pelayanan), dan (c) antar pusat-pusat dan wilayah pengaruhnya dihubungkan oleh jalur transportasi. Peningkatan aksesibilitas guna mendukung aktivitas masyarakat di era 5.0 yang berkarakter cepat, efektif, dan efisien membutuhkan sebuah sistem transportasi terintegrasi dan efisien, hingga pengembangan inovasi sistem kereta api yang menghubungkan wilayah-wilayah strategis bernilai ekonomi sangat dibutuhkan. Pada Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah (RPJMD) Sulawesi Utara 2016-2021 dituliskan bahwa untuk mendorong pertumbuhan pembangunan kawasan perkotaan maka melalui sinergitas pusat dan daerah akan dipercepat melalui pembangunan Kawasan Perkotaan Metropolitan BIMINDO (Bitung, Minahasa, Manado), serta peningkatan efisiensi pengelolaan dan optimalisasi peran kawasan perkotaan berukuran sedang sebagai penyangga (*buffer*) urbanisasi (Badan Perencanaan Daerah Kota Manado, 2016). Kota Manado sebagai ibukota provinsi berperan penting dalam sistem pemerintahan dan penopang pertumbuhan ekonomi provinsi dari segi perdagangan jasa, dan lapangan pekerjaan. Kota Bitung juga ikut menopang perekonomian provinsi melalui sistem pergerakan distribusi barang dan jasa secara nasional maupun internasional melalui pelabuhan Bitung yang dimilikinya. Sesuai dengan Peraturan Daerah Kota Bitung No. 11/2013 tentang RTRW Kota Bitung dan Peraturan Daerah No. 1/2014 tentang RTRW Provinsi Sulawesi Utara, Kota Bitung ditetapkan sebagai Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) dan merupakan kota berkembang menjadi kawasan ekonomi terpadu yang memiliki dukungan sumber daya alam/komoditas unggulan (Badan Perencanaan Daerah Kota Manado, 2014; Badan Perencanaan Daerah Kota Bitung, 2013). Tiga *flagship* utama atau bisnis utama di kawasan KEK ini adalah industri perikanan, industri berbasis kelapa, dan logistic (Badan Pembinaan Hukum Nasional, 2014).

Kabupaten Minahasa Utara merupakan kawasan peruntukan industri pengolahan hasil pertanian maupun industri manufaktur. Kawasan ini nantinya akan menjadi kawasan andalan yang memacu pertumbuhan ekonomi serta mendorong pemerataan perkembangan wilayah dan sebagai wilayah penyedia tenaga kerja bagi kedua kota tetangganya. Sebagai implikasi dari perbedaan sistem aktivitas dan fungsi kegiatan ketiga wilayah tersebut, peningkatan interaksi antar wilayah dan pergerakan manusia merupakan hal yang tidak dapat dihindari. Sebagai upaya mengantisipasi tingginya interaksi, dan pergerakan yang terjadi serta mensinergikan potensi ketiga kabupaten dan kota tersebut, Kementerian Perhubungan bekerjasama dengan Dinas Perhubungan Sulawesi Utara dalam mengembangkan jaringan kereta api koridor Manado-Bitung. Jaringan KA tersebut juga diarahkan untuk menciptakan *linkage* daerah yang berperan sebagai "*hinterland*" bagi KEK untuk mendukung pasokan bahan baku, dan daerah yang menampung "*multiplier effect*" dari kegiatan KEK. Layanan kereta api yang tidak layak dapat menyebabkan pengangkutan barang menggunakan prasarana jalan raya yang akhirnya menambah beban dan hambatan pada jalur yang dilewati dan menurunkan tingkat layanannya. Selain itu, waktu transit dan penundaan yang rutin terjadi dikarenakan jumlah gerbong barang yang tidak mencukupi dan infrastruktur juga ikut menjadi permasalahan utama. Banyak industri membayarkan biaya pengangkutan yang lebih tinggi untuk angkutan jalan raya karena tidak adanya layanan kereta api barang yang bisa diandalkan dan efisien. Tarif kereta api barang tidak dikontrol oleh pemerintah, walaupun kebanyakan konsumen PT. KA adalah organisasi yang bersifat parasit (Wachi, 2009). Kereta api regional memiliki efisiensi penggunaan bahan bakar dengan sumber yang lebih ekonomis karena mampu memindahkan barang dan penumpang lebih cepat dengan hambatan minimal, sehingga kemungkinan untuk peralihan moda yang awalnya didominasi oleh penggunaan jalan raya dapat dialihkan ke moda transportasi kereta api massal (Wachi, 2009).

Berdasarkan kondisi tersebut, dibutuhkan suatu studi yang mengkaji preferensi calon penumpang terhadap bentuk pelayanan kereta api yang diinginkan**.** Apabila bentuk pelayanan

sebuah moda transportasi baru tidak sesuai dengan preferensi pengguna potensial, keinginan untuk beralih menggunakan moda transportasi tersebut akan sangat rendah. Perencanaan fasilitas atau prasarana transportasi juga perlu melihat jumlah penduduk, sensitifitas perubahan tingkat pergerakan, dan dinamika perkembangan kota sekitar untuk memprediksikan terjadinya urbanisasi antar wilayah (Buchari, Hidayat, & Arliansyah, 2015). Rendahnya bentuk pelayanan sebuah moda transportasi akan menyebabkan penumpang cenderung memenuhi pergerakannya menggunakan kendaraan pribadi yang tentunya hal ini akan meningkatkan ketergantungan dan menurunkan kualitas lingkungan. Fokus penelitian yaitu mengetahui kebutuhan angkutan kereta api penumpang berdasarkan preferensi pelaku perjalanan eksisting bentuk pelayanan KA terhadap berbagai penumpang potensial. KA Manado-Bitung merupakan moda transportasi baru yang saat ini masih dalam tahap pembebasan lahan. Untuk itu, penelitian ini juga mengkaji bentuk pelayanan KA yang sesuai dengan preferensi masyarakat yang nantinya akan menggunakan angkutan tersebut.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif yang menggambarkan hasil kajian bentuk keinginan (preferensi) penumpang potensial terhadap atribut atau bentuk pelayanan dari rencana kereta api koridor Manado-Bitung. Pendekatan normatif juga digunakan dengan mengidentifikasi teori-teori terkait atribut pelayanan KA. Pengembangan sebuah sistem maupun produk baru memerlukan masukan mengenai kebutuhan pelanggan atau kepuasan pelanggan. Setelah apa yang menjadi kebutuhan pelanggan diinventarisir, maka konsep solusi untuk sebuah sistem atau produk baru dapat dibuat.

Preferensi yang dikaji merupakan preferensi terhadap pelayanan KA dengan cara menanyakan secara langsung kepada responden dengan teknik stated preference melalui kuesioner. Pemilihan teknik analisis yang sesuai untuk analisis data stated preference tergantung pada jenis respon yang

diperoleh dari pelaksanaan survai yang dapat berupa data ranking (Nugraha Djoeddawi, Ruslin Anwar, & Kusumaningrum, 2014). Faktor utama yang berpengaruh terhadap penentuan keputusan pelaku perjalanan adalah kondisi sosial ekonomi dan pola aktifitas pelaku perjalanan. Keputusan- keputusan yang dibuat oleh pelaku perjalanan sangat menentukan kuantitas, distribusi moda dan rute serta waktu dari sarana transportasi.

Analisis sensitivitas guna melihat jumlah probabilitas penggunaan KA oleh calon penumpang, dan uji *chi-square* guna melihat hubungan karakteristik penumpang potensial terhadap kecenderungan preferensi juga dilakukan dalam penelitian ini. Data yang digunakan adalah data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari hasil wawancara dan penyebaran kuesioner secara langsung kepada responden di lokasi studi. Kuesioner bertujuan memperoleh data dan informasi mengenai identifikasi karakteristik dan preferensi responden. Objek yang menjadi sasaran wawancara dan penyebaran kuesioner adalah pelaku perjalanan di daerah studi dengan karakteristik; berusia >17 tahun, melakukan pergerakan minimal 2 kali dalam seminggu, melakukan pergerakan antarkota Manado, Kabupaten Minahasa Utara, dan Kota Bitung. Sampel yang digunakan sebanyak 200 responden. Responden adalah pelaku perjalanan yang melakukan perjalanan di koridor Manado-Bitung. Data sekunder berupa kajian rencana pengembangan jaringan kereta api koridor Manado-Bitung dikategorikan sebagai rencana hasil kajian pemerintah. Data sekunder lain yang digunakan adalah rencana tata ruang wilayah (RTRW) Kota Manado, Kabupaten Minahasa Utara (Badan Perencanaan Daerah Kabupaten Minahasa Utara, 2013), dan Kota Bitung. Dokumen-dokumen RTRW ini digunakan untuk mengetahui gambaran umum lokasi studi.

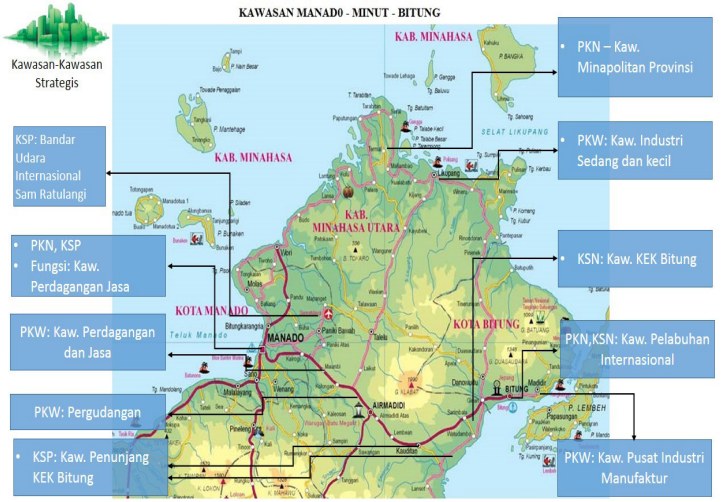
Teknik analisis data yang akan dipergunakan dalam penelitian ini adalah deskriptif kuantitatif serta deskriptif kualitatif. Teknik analisis kuantitatif yang dipergunakan dalam penelitian ini menggunakan tabel distribusi frekuensi dan analisis tabulasi silang *(cross tabulation)*. Teknik analisis deskriptif kualitatif digunakan untuk mendeskripsikan dan menginterpretasikan hasil dari distribusi frekuensi dan hasil tabulasi silang. Analisis tabulasi silang (*crosstab*) digunakan untuk melihat bentuk

preferensi penumpang potensial dan melihat hubungannya terhadap karakteristik penumpang potensial tersebut. Beberapa atribut pelayanan KA yang dikaji, diperoleh dari tinjauan literatur.

PEMBAHASAN

1. Peran dan Fungsi Kereta Api Koridor Manado-Bitung

Kota Manado, Kabupaten Minahasa Utara, dan Kota Bitung merupakan beberapa kota kabupaten yang memiliki sistem kegiatan skala provinsi dan skala nasional yang sangat perlu ditunjang perkembangannya. Pusat-pusat kegiatan pada ketiga kabupaten dan kota tersebut nantinya akan menciptakan dan meningkatkan pertumbuhan dan intensitas kegiatan serta berdampak langsung pada meningkatnya pergerakan antar wilayah. Peningkatan pergerakan tersebut akan menjadi *demand* utama bagi jaringan kereta api koridor Manado-Bitung nantinya. Beberapa pusat kegiatan di ketiga kota/kabupaten tersebut digambarkan seperti pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Pusat-Pusat Kegiatan di Provinsi Sulawesi Utara

Kondisi tingkat pelayanan untuk ruas jalan Manado-Bitung (non-tol) pada saat ini adalah A (arus bebas) dengan derajat kejenuhan pada ruas jalan tersebut ≤ 0,35 (Petracia, Jansen, Lintong, & Rumajar, 2012). Kondisi tersebut membuktikan bahwa peluang peningkatan moda transportasi lain sangat memungkinkan. Pembangunan infrastruktur transportasi jaringan KA koridor Manado-Bitung tidak hanya berfungsi untuk meningkatkan perkembangan pusat-pusat kegiatan, namun juga berperan dalam 2 (dua) hal berikut.

1. KEK di Kota Bitung dan sebagian kecamatan di Kabupaten Minahasa Utara mendukung kegiatan perekonomian Sulawesi Utara yaitu pengembangan Kawasan Pengembangan Ekonomi Terpadu (KAPET) Manado-Bitung. Konsep Rencana Tata Ruang KAPET diarahkan untuk mendorong (sub) sector unggulan masing-masing koridor MP3EI (Masterplan Percepatan dan Perluasan Pembangunan Ekonomi Indonesia) (Soedrajat, 2013).
2. Beberapa kawasan yang memiliki aktivitas yang mendukung perekonomian Provinsi Sulawesi Utara diantaranya dijabarkan pada Gambar 2 berikut.

Sumber: Kementerian PUPR, 2013

Gambar 2. Kawasan dengan Kegiatan Ekonomi di Provinsi Sulawesi Utara

Kawasan industri Bitung telah ada dan berkembang sebelum ditetapkan menjadi KEK dan setelah kawasan industri ini dijadikan sebagai bagian dari KEK hal ini memberi keuntungan dalam pengembangan KEK selanjutnya. Salah satu fungsi dari pembangunan KA Manado-Bitung adalah mengembangkan kawasan ekonomi. Pengembangan KEK harus didukung dengan infrastruktur yang baik terintegrasi dengan skala regional supaya pengembangan KEK dapat maksimal. Infrastruktur pendukung KEK merupakan infrastruktur yang dapat memberikan aksesibilitas secara nasional maupun internasional. Keberadaan pusat-pusat kegiatan di kota dan kabupaten yang dilalui trase rencana dinilai akan menjadi potensi *demand* baik penumpang maupun barang dalam pengoperasian KA nantinya.

2. Analisis Preferensi Pengguna Potensial Terhadap Bentuk Pelayanan KA Koridor Manado-Bitung

Faktor-faktor prioritas yang dinilai menjadi komponen utama yang berpengaruh dalam pemilihan moda KA oleh calon penumpang adalah ketepatan keberangkatan dan waktu tiba, kesesuaian jumlah kereta dan gerbong dengan jumlah penumpang, serta jadwal waktu keberangkatan yang sesuai dengan waktu keberangkatan beraktifitas penumpang (Rasyid, Lumban Gaol, & Kunci, 2013). Tingkat pelayanan merupakan elemen dasar terhadap penampilan komponen-komponen transportasi, sehingga pelaku perjalanan tertarik untuk menggunakan suatu produk jasa transportasi. Menurut Miro (2005), salah satu faktor yang diasumsikan berpengaruh terhadap perilaku perjalanan (*trip maker behavior*) dalam menggunakan suatu moda transportasi adalah faktor karakteristik sistem transportasi atau kinerja pelayanan sistem transportasi (Tamin, 2000). Beberapa variabel yang berpengaruh dalam kinerja pelayanan sistem transportasi adalah sebagai berikut.

a. Variabel waktu relatif (lama) perjalanan mulai dari lamanya waktu menunggu kendaraan di pemberhentian (terminal), waktu jalan ke terminal, dan waktu di atas kendaraan.
b. Variabel biaya relatif perjalanan, yaitu seluruh biaya yang timbul akibat melakukan perjalanan dari asal ke tujuan untuk semua moda yang berkompetisi seperti tarif tiket, bahan bakar dan lain-lain.
c. Variabel tingkat pelayanan relatif merupakan variabel yang cukup bervariasi dan sulit diukur, contohnya adalah variabel-variabel kenyamanan dan kesenangan, yang membuat orang mudah gonta-ganti moda transportasi.
d. Variabel tingkat akses/indeks daya hubung/kemudahan pencapaian tempat tujuan.
e. Variabel tingkat kehandalan angkutan umum di segi waktu (tepat waktu/*reliability*), ketersediaan ruang parkir dan tarif.

Berdasarkan tingkat pelayanan dalam suatu sistem transportasi, terbagi atas 2 bagian yaitu tergantung arus dan fasilitas. Sementara menurut (Stephenson, 1987) dalam bukunya yang berjudul "*Transportation USA*" menyatakan bahwa faktor-

faktor yang mempengaruhi tingkat pelayanan penumpang antara lain adalah sebagai berikut.

a. Kecepatan dalam setiap melakukan perjalanan, tentunya orang memilih moda yang memiliki kecepatan yang dapat diandalkan.
b. Ketepatan waktu, yaitu menyangkut ketepatan waktu keberangkatan dan tiba suatu moda transportasi.
c. Keamanan merupakan faktor yang paling penting karena ini menyangkut jiwa seseorang. Adanya jaminan keselamatan yang tinggi pada setiap moda transportasi tentunya akan berpengaruh terhadap tingkat pemakaian moda tersebut.
d. Aksesibilitas merupakan jangkauan jalan yang luas, serta memiliki akses yang mudah untuk melanjutkan perjalanan dari dan ke terminal.
e. Kenyamanan, yaitu menyangkut segala fasilitas penunjang sehingga penumpang dapat menikmati perjalanannya.
f. Terminal atau stasiun yang nyaman akan memberikan kemudahan bagi penumpang pada saat pergi dan tiba dari tempat tujuan.

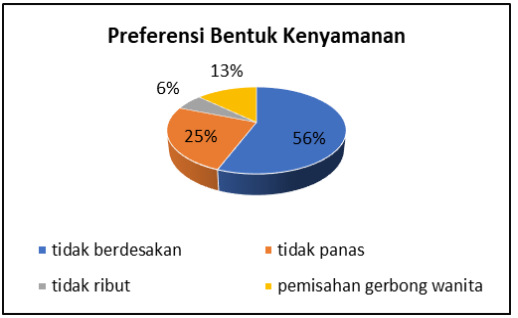
Analisis preferensi terhadap atribut pelayanan kereta koridor Manado-Bitung ini didasarkan beberapa teori mengenai tingkat pelayanan kereta api pada umumnya. Tingkat pelayanan yang dianalisis dalam penelitian adalah preferensi terhadap atribut pelayanan (frekuensi kereta api, konektivitas, waktu tempuh, dan tarif). Hasil rekapitulasi preferensi penumpang potensial dianalisis menggunakan analisis deskriptif kualitatif, yaitu menggambarkan jumlah persentase tiap variabel. Gambaran yang diperoleh diasumsikan dapat mewakili preferensi penumpang potensial yang nantinya menjadi pengguna kereta api koridor Manado-Bitung.

3. Analisis Preferensi Terhadap Atribut Pelayanan KA

Tingkat kepentingan terhadap bentuk pelayanan merupakan ukuran apakah keberadaan dari layanan tersebut sangat dibutuhkan. Atribut layanan yang keberadaannya sangat dibutuhkan dan sangat mempengaruhi kinerja pelayanan akan mendapatkan nilai prioritas yang tinggi. Bentuk pelayanan yang

nilai kepentingannya tinggi harus mendapat perhatian serius dari pihak pengelola karena bentuk pelayanan ini akan dominan mempengaruhi tingkat kinerja dan menarik penumpang.

Sebagai moda transportasi baru yang sedang dalam tahap pembangunan, perencanaan pola operasional dan bentuk layanan KA koridor Manado-Bitung menjadi permasalahan penting untuk dianalisis dan dipertimbangkan. Sebagai moda transportasi baru, preferensi pelaku perjalanan yang diasumsikan menjadi penumpang potensial sangat penting untuk dipertimbangkan sehingga akan meningkatkan loyalitas penumpang potensial KA untuk menggunakan moda transportasi tersebut.



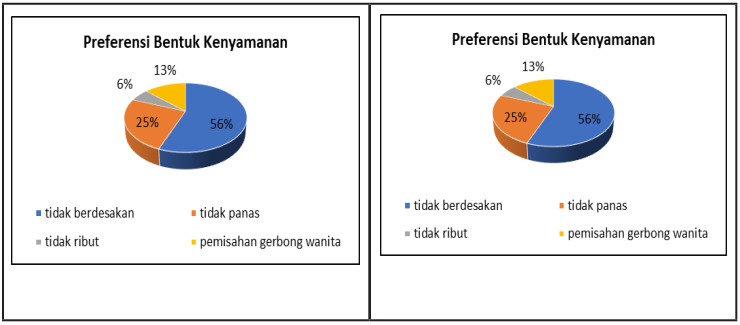
Gambar 3. Kesediaan Menggunakan angkutan KA

Pada Gambar 3 di atas dijelaskan tentang kesediaan menggunakan KA oleh responden yaitu sebanyak 84% bersedia dan 16% tidak bersedia. Diasumsikan 16% responden yang tidak bersedia, tidak akan menggunakan KA meski dipenuhi preferensinya terhadap atribut pelayanan. Maka, preferensi yang dijelaskan di bawah ini merupakan preferensi dari jumlah responden yang bersedia menggunakan KA nantinya.

a. Preferensi terhadap Keamanan dan Kenyamanan

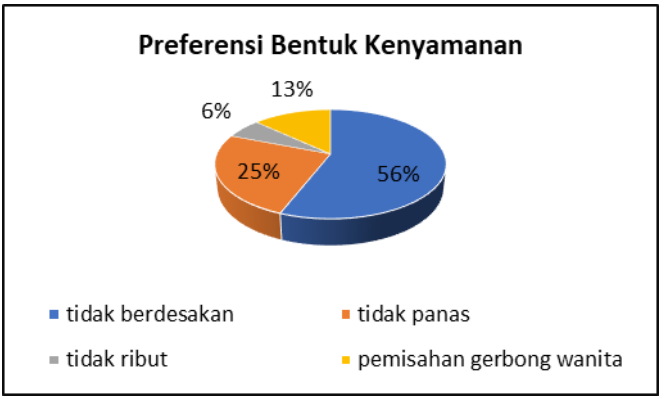
Merasa aman dalam menggunakan transportasi umum merupakan hal mutlak yang menjadi pertimbangan dasar pelaku perjalanan dalam menggunakan transportasi umum. Terlebih bagi transportasi umum yang belum pernah digunakan oleh masyarakat umum di suatu daerah. Berdasarkan kuesioner yang

disebarkan, responden yang diasumsikan sebagai penumpang potensial memiliki persepsi tersendiri mengenai keamanan transportasi. Pertimbangan-pertimbangan tersebut menjadikan faktor keamanan menjadi hal yang sangat dipertimbangkan dalam memilih moda angkutan yang digunakan. Bahkan dalam situasi dan kondisi tertentu, masyarakat bersedia membayar lebih apabila faktor keamanan dijamin oleh penyedia jasa transportasi.



Gambar 4. Preferensi terhadap Tingkat Keamanan dan Kenyamanan

Gambar 4 menunjukkan bahwa keamanan diprioritaskan oleh 91% responden pengguna potensial dan kenyamanan diprioritaskan sebanyak 60%. Sebagai moda transportasi KA pertama di provinsi Sulawesi Utara, masyarakat sangat memprioritaskan keamanan. Keamanan dianggap sebagai jaminan dalam meningkatkan kepercayaan masyarakat menggunakan moda transportasi baru KA. Sementara kenyamanan menjadi prioritas kedua setelah keamanan yang mendominasi preferensi penumpang potensial. Nampak pada Gambar 4 di atas, sebesar 60% responden sangat memprioritaskan tingkat kenyamanan KA, 26% memprioritaskan kenyamanan, dan 14% sisanya berpendapat bahwa kenyamanan cukup diprioritaskan.

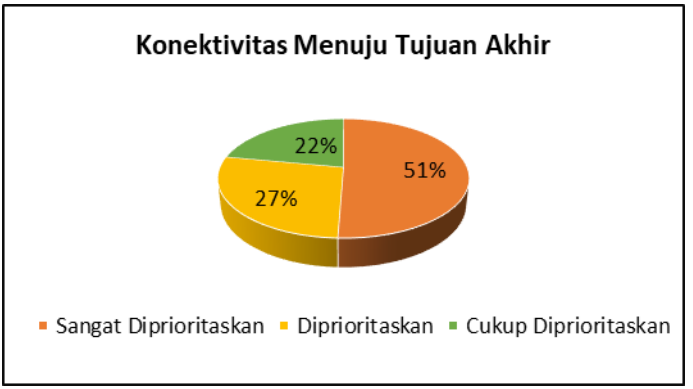


Gambar 5. Preferensi Penumpang Potensial terhadap Bentuk Kenyamanan

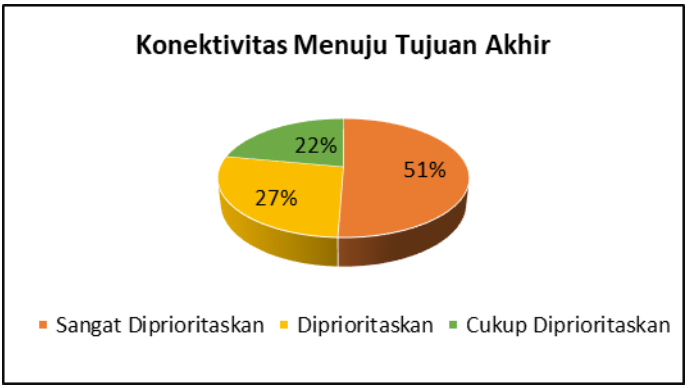
Pada Gambar 5 nampak bahwa preferensi calon penumpang sebesar 56% responden menganggap tidak berdesakan di dalam KA sangat penting, 25% memiliki preferensi terhadap suhu yang tidak panas, 6% memiliki preferensi terhadap tingkat kebisingan yang rendah, dan 13% sisanya memilih pemisahan gerbong wanita untuk menunjang kenyamanan.

b. Preferensi Terhadap Konektivitas

Konektivitas memainkan peran penting dalam sebuah penyelenggaraan transportasi (terutama transportasi multi-moda). Konektivitas adalah bagaimana keterhubungan antara jaringan sehingga ada keberlanjutan sebuah pergerakan. Sehingga jika konektivitas semakin meningkat, maka jarak perjalanan akan menurun dan efisiensi akan tercapai. Pada survei yang dilakukan, konektivitas yang ditanyakan terhadap pelaku perjalanan adalah preferensi mereka terhadap kemudahan mencapai stasiun atau kemudahan dalam mencapai tujuan akhir perjalanan. Hasil survei tersebut digambarkan pada Gambar 6 dan 7 di bawah ini.



Gambar 6. Preferensi terhadap Konektivitas Menuju Stasiun



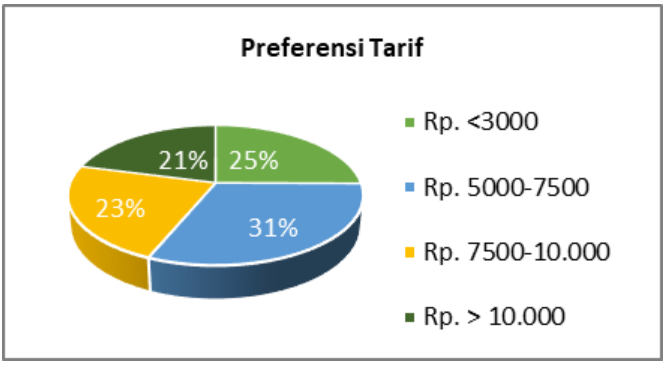
Gambar 7. Preferensi Penumpang Potensial Terhadap Menuju Stasiun Akhir

Bentuk pelayanan berupa konektivitas baik konektivitas menuju stasiun dan konektivitas menuju tujuan akhir, berdasarkan Gambar 6 diketahui bahwa 49% responden sangat memprioritaskan konektivitas menuju stasiun, 27% berpendapat diprioritaskan, dan 24% sisanya menganggap cukup diprioritaskan. Pada Gambar 7, menunjukkan bahwa sebanyak 51% sangat memprioritaskan konektivitas menuju

tujuan akhir, 27% memprioritaskan, dan 22% sisanya berpendapat cukup diprioritaskan. Berdasarkan pilihan yang diberikan kepada responden mengenai tingkat prioritas konektivitas menuju stasiun dan konektivitas menuju tujuan akhir, responden lebih cenderung memprioritaskan konektivitas menuju tujuan akhir. Tingginya prioritasisasi konektivitas menuju tujuan akhir mengindikasikan preferensi masyarakat terhadap lokasi stasiun. Lokasi stasiun yang memiliki aksesibilitas tinggi menuju pusat-pusat kegiatan masyarakat akan lebih dipilih dan meningkatkan loyalitas masyarakat dalam menggunakan transportasi KA dibandingkan aksesibilitas stasiun menuju area pemukiman.

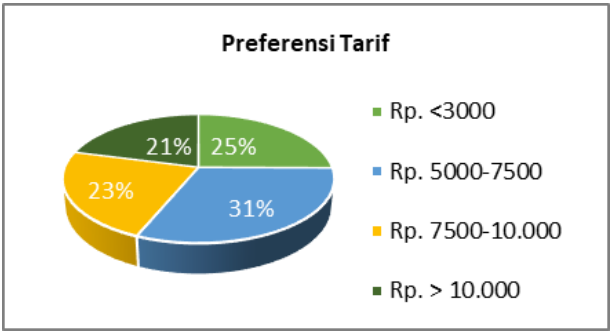
c. Preferensi terhadap Waktu Perjalanan

Waktu tunggu menjadi faktor penting yang mempengaruhi preferensi penumpang dalam memilih moda transportasi. Semakin rendah waktu tunggu maka akan semakin sedikit waktu tempuh perjalanan. Waktu tunggu digambarkan dengan atribut frekuensi keberangkatan KA. Semakin singkat waktu antara keberangkatan kereta, maka akan semakin singkat pula waktu tempuh perjalanan. Sebanyak 86% responden sangat mempertimbangkan waktu perjalanan dalam memilih moda yang digunakan. Berdasarkan survei yang dilakukan, preferensi responden terhadap frekuensi keberangkatan KA dapat dilihat pada Gambar 8 di bawah ini.



Gambar 8. Preferensi Penumpang Potensial terhadap Frekuensi KA

Terkait dengan preferensi frekuensi keberangkatan KA, sebanyak 41% responden memiliki preferensi frekuensi setiap 15 menit, 30% menginginkan frekuensi keberangkatan setiap 20 menit, 16% memilih setiap 30 menit, dan 13% sisanya bersedia menunggu keberangkatan KA setiap 40 menit. Diketahuinya preferensi terhadap frekuensi keberangkatan KA ini dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan dalam merencanakan pola operasional KA yang sesuai dengan preferensi penumpang potensial. Informasi preferensi ini juga dapat dijadikan masukan dalam menentukan jumlah armada yang beroperasi nantinya.

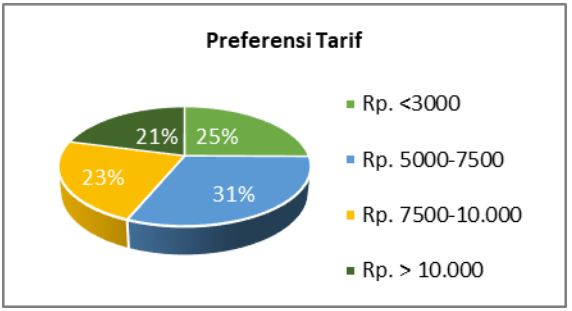


Gambar 9. Preferensi Penumpang Potensial terhadap Waktu Tempuh

Tidak jauh berbeda dengan preferensi penumpang potensial terhadap waktu tunggu (*headway*), preferensi terhadap waktu tempuh yang diinginkan oleh penumpang potensial adalah terbanyak 55% menginginkan waktu tempuh selama 45 menit, 29% responden menginginkan waktu tempuh selama 60 menit, 10% responden bersedia menggunakan KA dengan waktu tempuh selama 90 menit, dan hanya 6% responden yang bersedia menggunakan KA dengan durasi waktu tempuh selama 105 menit.

d. Preferensi terhadap Biaya Perjalanan

Tarif adalah biaya yang dibayarkan oleh pengguna jasa angkutan umum per satuan berat atau penumpang per km. Penetapan tarif dimaksudkan untuk mendorong terciptanya penggunaan sarana dan prasarana per angkutan secara optimum dengan mempertimbangkan lintas yang bersangkutan. Berkaitan dengan penetapan tarif bagi angkutan baru, survei mengenai keinginan membayar calon penumpang perlu dilakukan guna melihat probabilitas penggunaan moda berdasarkan biaya yang diinginkan. Hasil skala likert yang dilakukan dari data survei, diperoleh sebanyak 85% responden sangat memprioritaskan faktor tarif dalam pemilihan moda.



Gambar 10. Preferensi Penumpang Potensial terhadap Kesediaan Membayar

Berdasarkan faktor kesediaan membayar pada Gambar 10, sebanyak 31% bersedia membayar Rp 5.000-7.500, 25% bersedia membayar Rp <3.000, 23% bersedia membayar Rp 7.500-10.000, dan sisanya sebesar 21% bersedia membayar lebih dari Rp 10.000. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa dari segi tarif, tidak ada jumlah yang mendominasi lebih dari 50% sehingga dapat dikatakan bahwa masyarakat masih mau membayar selama tarif yang ditawarkan <Rp 10.000 atau tidak jauh >Rp 10.000.

4. Hubungan Karakteristik dengan Preferensi Pengguna Potensial terhadap Atribut Pelayanan KA

Variabel-variabel yang diasumsikan berdasarkan teori memiliki hubungan dengan preferensi terhadap tingkat pelayanan KA akan dianalisis menggunakan tabulasi silang dan dilanjutkan dengan uji *chi-square* untuk melihat signifikansi hubungan antar variabel. Data hasil rekapitulasi kuesioner terlebih dahulu dianalisis menggunakan analisis tabulasi silang atau *crosstab* dengan program PASW 18 kemudian dilanjutkan dengan uji *chi-square* untuk melihat signifikansi hubungan. Pengujian *Chi-Square* ini digunakan untuk mengetahui frekuensi dua data observasi terhadap frekuensi data observasi yang diharapkan (*expected value*). Pada analisis ini, preferensi penumpang potensial adalah preferensi terhadap bentuk pelayanan kereta berupa tingkat keamanan, kenyamanan, waktu perjalanan, konektivitas, dan biaya perjalanan. Informasi tentang hubungan karakteristik responden yang diasumsikan sebagai calon penumpang atau penumpang potensial, dapat memberi masukan terhadap perencanaan bentuk pelayanan. Hubungan karakteristik sosioekonomi responden dengan preferensi atribut pelayanan KA dapat di lihat pada tabel hasil uji *chi-square* (*Asymp. Sig*) menggunakan analisis *statistic descriptive crosstab* berikut.

Tabel 1. Hubungan Karakteristik Responden dan Preferensi

	Konektivitas menuju stasiun	Konektivitas menuju tujuan akhir	Preferensi Frekuensi KA	Preferensi waktu tempuh	Preferensi bentuk kenyamanan	Tarif
Karakteristik Sosioekonomi						
Jenis Kelamin	,683	,537	,373	,091	,315	,719
Usia	,367	,111	,092	,177	,070	,018
Pekerjaan	,636	,857	,300	,011	,926	,000
Pendapatan	,908	,214	,135	,813	,669	,022
Pendidikan	,889	,483	,767	,370	,405	,000
Kepemilikan Kendaraan	,991	,437	,536	,014	,344	,183

	Konektivitas menuju stasiun	Konektivitas menuju tujuan akhir	Preferensi Frekuensi KA	Preferensi waktu tempuh	Preferensi bentuk kenyamanan	Tarif
Jumlah kendaraan yang dimiliki	,913	,505	,156	,564	,103	,029
Karakteristik Pergerakan						
Asal	,899	,569	,065	,344	,297	,023
Tujuan	,870	,379	,111	,534	,510	,098
Maksud	,749	,406	,001	,316	,603	,001
Moda yang digunakan	,613	,888	,067	,079	,794	,056
Frekuensi	,466	,599	,006	,610	,446	,109
Jarak Perjalanan	,528	,600	,120	,101	,025	,034
Biaya Perjalanan	,424	,760	,048	,961	,312	,086
Waktu Tempuh Perjalanan	,318	,622	,027	,788	,257	,050

Berdasarkan hasil uji *chi-square* pada Tabel 1 terlihat bahwa ada hubungan signifikan antara karakteristik pelaku perjalanan dengan preferensi terhadap atribut pelayanan KA. Hubungan signifikan tersebut terdapat pada 6 atribut pelayanan KA, dengan karakteristik sosioekonomi mempengaruhi 2 atribut yaitu preferensi waktu tempuh dan tarif. Waktu tempuh memiliki hubungan signifikan dengan karakteristik pekerjaan dan kepemilikan kendaraan responden. Kepemilikan angkutan pribadi dinilai sangat berpengaruh pada pemilihan moda angkutan umum dalam melakukan aktivitas harian (Syoufrizha Rangkuti & Agung Sugiri, 2014). Pekerjaan memiliki nilai *Asymp. Sig 0,011,* sedangkan karakteristik kepemilikan kendaraan memiliki nilai *Asymp. Sig 0,014.* Kedua nilai tersebut lebih rendah dari 0,05 sehingga disimpulkan bahwa H_0 ditolak dan H_1 diterima. Bentuk hubungan tersebut dapat dilihat melalui analisis *crosstab* pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. *Crosstab* Karakteristik Sosioekonomi terhadap Atribut Waktu Tempuh KA

		Preferensi_waktu_tempuh				Total
		45 Menit	60 Menit	90 Menit	105 Menit	
Pekerjaan	Mahasiswa/ Pelajar	23	16	6	4	49
	Wirausaha	12	8	2	1	23
	Guru/Dosen	10	6	0	6	22
	PNS/ Pegawai	18	12	2	0	32
	Swasta	25	7	5	0	37
	Lainnya	4	0	1	0	5
Total		92	49	16	11	168
Jumlah Kendaraan	0 Unit	14	8	5	0	27
	1 Unit	50	27	7	9	93
	2 Unit	21	12	3	1	37
	3 Unit	7	2	1	1	11
Total		92	49	16	11	168

Hasil *crosstab* menunjukkan bahwa penumpang potensial yang berprofesi sebagai mahasiswa/pelajar, wirausaha, dan lainnya cenderung menginginkan waktu tempuh perjalanan selama 45 menit untuk meningkatkan efektifitas waktu. Kepemilikan kendaraan baik sepeda motor maupun mobil pribadi cenderung memilih waktu 45 menit karena singkatnya waktu perjalanan menjadi faktor utama yang menjadi pertimbangan mereka dalam memilih moda transportasi yang akan digunakan. Hal ini dikarenakan, pengguna kendaraan pribadi memiliki pilihan rute yang lebih banyak daripada pengguna angkutan umum sehingga mereka dapat memilih rute terpendek dan dengan waktu tempuh lebih rendah.

Atribut pelayanan KA berikutnya yang memiliki hubungan signifikan dengan karakteristik sosioekonomi penumpang potensial adalah tarif. Berdasarkan 7 komponen karakteristik sosioekonomi, ada 5 komponen yang memiliki hubungan

siginifikan, yaitu usia, pekerjaan, pendapatan, pendidikan, dan jumlah kendaraan yang dimiliki. Usia memiliki nilai *Asymp. Sig* 0,018. Nilai ini lebih rendah dari 0,05 sehingga hubungan usia dengan tarif tergolong cukup signifikan. Pekerjaan memiliki *Asymp. Sig 0,000* nilai ini merupakan nilai terendah dari komponen karakteristik yang lain sehingga hubungan antara pekerjaan dengan tarif sangat signifikan. Pendapatan meski bentuk hubungannya tidak terlalu signifikan, pendapatan memiliki nilai *Asymp. Sig 0,022*. Hasil uji *chi square* menunjukkan bahwa nilai *Asymp. Sig* dari karakteristik pendidikan mencapai *0,00* sehingga dapat disimpulkan bahwa signifikansi hubungannya sangat tinggi. Karakteristik sosioekonomi terakhir yang memiliki hubungan dengan preferensi tarif adalah jumlah kendaraan yang dimiliki dengan nilai *Asymp. Sig 0,028.* Secara rinci bentuk hubungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Crosstab Karakteristik Sosioekonomi terhadap Atribut Tarif

		Preferensi Tarif				Total
		3000	5000	7500	10.000	
Usia	15-25 Tahun	13	30	15	12	70
	26-35 Tahun	13	14	13	16	56
	36-45 Tahun	8	2	9	3	22
	46-55 Tahun	8	7	1	4	20
Total		42	53	38	35	168
Pekerjaan	Mahasiswa/ Pelajar	8	21	15	5	49
	Wirausaha	5	9	4	5	23
	Guru/Dosen	12	2	2	6	22
	PNS/Pegawai	9	4	5	14	32
	Swasta	7	13	12	5	37
	Lainnya	1	4	0	0	5
Total		42	53	38	35	168
Pendapatan	< Rp. 999.999	12	23	16	6	57
	Rp. 1.000.000 - 1.999.999	7	8	6	11	32
	Rp. 2.000.000 - 2.999.999	9	13	8	5	35
	Rp. 3.000.000 -3.999.999	13	5	4	12	34

		Preferensi Tarif				Total
		3000	5000	7500	10.000	
	> Rp. 4.000.000	1	4	4	1	10
Total		42	53	38	35	168
Pendidikan	SD	1	0	0	0	1
	SMP	2	16	4	1	23
	SMA	11	9	17	7	44
	D1/D2/D3/D4	4	10	2	13	29
	S1/S2/S3	24	18	15	14	71
Total		42	53	38	35	168
Jumlah Kendaraan	0	8	7	10	2	27
	1	29	26	20	18	93
	2	5	15	7	10	37
	3	0	5	1	5	11
Total		42	53	38	35	168

Karakteristik usia 15-25 tahun cenderung bersedia membayar tarif Rp 5.000-7.500. Berdasarkan survei yang dilakukan, pelaku perjalanan dengan rentang usia 15-25 sebagian besar berprofesi sebagai mahasiswa dan pelajar sekolah dengan maksud perjalanan dominan adalah sekolah dan rekreasi. Dalam sekali perjalanan, biaya transportasi yang dikeluarkan dapat mencapai Rp 50.000, sehingga mereka cenderung bersedia membayar biaya transportasi dengan rentang Rp 5.000-7.500 (30 orang), Rp 7.500-10.000 (15 orang) dan Rp >10.000 (12 orang).

Jenis pekerjaan juga memiliki hubungan yang signifikan dengan tarif yang dipilih. Hal ini dapat dilihat dari Tabel 3 di atas, responden yang berprofesi sebagai guru/dosen cenderung bersedia membayar sebesar <Rp 3.000, kemudian responden dengan profesi mahasiswa, wirausaha, dan swasta cenderung bersedia membayar sebesar Rp 5.000 dan Rp 7.500, sedangkan responden yang berprofesi sebagai PNS bersedia membayar >Rp 10.000.

Faktor terakhir yang memiliki hubungan signifikan dengan preferensi tarif KA adalah pendidikan. Responden dengan pendidikan terakhir SMP cenderung bersedia membayar Rp 5.000, pendidikan SMA cenderung bersedia membayar Rp 7.500, pendidikan D1/D2/D3/D4 bersedia membayar >Rp 10.000, dan responden dengan tingkat pendidikan S1/S2/S3 cenderung

bersedia membayar Rp 3.000. Pelaku perjalanan dengan pendapatan <Rp 999.999, Rp 2.000.000 - 2.999.999, dan >Rp 4.000.000 cenderung bersedia membayar sebesar Rp 5.000; Rp 1.000.000 - 1.999.999 cenderung bersedia membayar Rp 10.000, dan responden yang berpendapatan sebesar Rp 3.000.000 - 3.999.999 bersedia membayar Rp 3.000.

Preferensi frekuensi keberangkatan KA merupakan preferensi yang paling banyak memiliki hubungan dengan karakteristik pergerakan pelaku potensial, yang artinya karakteristik pergerakan menjadi variabel yang berpengaruh dalam bentuk frekuensi KA yang diinginkan. Misalnya responden yang melakukan perjalanan dengan frekuensi tinggi, jarak dan biaya yang tinggi dengan maksud bekerja cenderung mempertimbangkan atribut frekuensi keberangkatan KA dalam memilih moda transportasi harian.

Tabel 4. Crosstab Karakteristik Pergerakan terhadap Atribut Frekuensi KA

		Preferensi frekuensi KA (menit)				Total
		15	20	30	40	
Maksud	Bekerja	43	23	8	4	78
	Sosial (Rekreasi/ Belanja/ Mengunjungi keluarga)	16	19	16	16	67
	Pendidikan (Sekolah/Kampus)	8	5	1	1	15
	Lainnya	1	4	2	1	8
Total		68	51	27	22	168
Frekuensi	0 - 2 kali seminggu	19	23	18	14	74
	3-4 kali seminggu	10	6	3	4	23
	5-6 kali seminggu	38	19	5	3	65
	setiap hari	1	3	1	1	6
Total		68	51	27	22	168

		Preferensi frekuensi KA (menit)				Total
		15	20	30	40	
Biaya Perjalanan	Rp. 0 - 20.000	30	15	2	3	50
	Rp. 20.100 - 30.000	11	10	5	6	32
	Rp. 30.100 - 40.000	13	9	7	5	34
	Rp. 40.100 - 50.000	8	12	7	3	30
	> Rp. 50.000	6	5	6	5	22
Total		68	51	27	22	168
Waktu Tempuh Perjalanan	0-30 Menit	21	8	5	3	37
	31-60 Menit	20	24	9	11	64
	61-90 Menit	11	14	8	8	41
	91-120 Menit	16	5	5	0	26
Total		68	51	27	22	168

Berdasarkan Tabel 4 diketahui bahwa penumpang potensial cenderung mempertimbangkan frekuensi KA dengan melihat pola pergerakan harian mereka. Terlihat bahwa sebagian besar penumpang dengan maksud perjalanan untuk bekerja sebanyak 43 orang dan maksud perjalanan untuk pendidikan sebanyak 8 menginginkan frekuensi KA setiap 15 menit, penumpang dengan frekuensi perjalanan 5-6 kali seminggu sebanyak 38 responden bersedia menggunakan apabila frekuensi setiap 15 menit. Sebanyak 19 responden dengan maksud perjalanan untuk hiburan/sosial cenderung menginginkan frekuensi setiap 30 menit. Sedangkan dari karakteristik waktu tempuh perjalanan diketahui responden yang menempuh perjalanan selama 0-30, 61-90, 91-120 menit cenderung memilih setiap 15 menit; 31-60 menit cenderung memilih setiap 20 menit.

Tabel 5. Crosstab Karakteristik Pergerakan terhadap Atribut Tarif

		Preferensi WTP				Total
		3000	5000	7500	10.000	
Maksud	Bekerja	26	15	13	24	78
	Sosial (Rekreasi/ Belanja/ Mengunjungi keluarga)	10	32	17	8	67
	Pendidikan (Sekolah/ Kampus)	4	2	7	2	15
	Lainnya	2	4	1	1	8
Total		42	53	38	35	168
Jarak	0-15 km	11	9	13	8	41
	16-30 km	14	24	9	8	55
	31-45 km	7	7	1	10	25
	46-60 km	10	13	15	9	47
Total		42	53	38	35	168
Waktu Tempuh Perjalanan	0-30 Menit	13	7	7	10	37
	31-60 Menit	12	21	18	13	64
	61-90 Menit	6	18	11	6	41
	91-120 Menit	11	7	2	6	26
Total		42	53	38	35	168

Mengacu pada hasil uji *chi-square* pada Tabel 1, karakteristik maksud perjalanan juga menjadi karakteristik pergerakan yang memiliki hubungan signifikan dengan keinginan membayar responden. Reponden yang melakukan perjalanan dengan maksud untuk bekerja sebanyak 26 responden cenderung bersedia membayar Rp 3.000; perjalanan dengan maksud sosial baik untuk rekreasi, belanja, ataupun mengunjungi keluarga cenderung bersedia membayar Rp 5.000; perjalanan dengan maksud pendidikan cenderung bersedia membayar Rp 7.500.

Karakteristik jarak perjalanan yang ditempuh merupakan variabel berikut yang memiliki hubungan dengan preferensi tarif yang bersedia dibayar. Responden dengan jarak perjalanan 0-15 km sebanyak 13 responden cenderung bersedia membayar Rp 7.500, jarak perjalanan 16-30 km sebanyak 24 responden cenderung membayar Rp 5.000, responden yang melakukan perjalanan dengan jarak 31-45 km cenderung bersedia membayar >Rp 10.000 (10 responden) dan responden dengan jarak perjalanan terpanjang 46-60 km sebanyak 15 responden cenderung bersedia membayar Rp 7.500. Berdasarkan hasil tersebut dapat dilihat bahwa jauhnya jarak perjalanan tidak berbanding lurus dengan jumlah yang bersedia dibayarkan.

Karakteristik perjalanan berikut yang memiliki hubungan dengan kesediaan membayar adalah karakteristik waktu tempuh perjalanan. Responden dengan waktu tempuh perjalanan harian 0-30 menit cenderung bersedia membayar Rp 3.000; waktu tempuh perjalanan harian 31-60 menit sebanyak 21 responden cenderung bersedia membayar Rp 5.000; responden dengan waktu perjalanan selama 61-90 menit sebanyak 11 responden cenderung bersedia membayar Rp 7.500.

5. Sensitivitas Penggunaan Angkutan KA oleh Penumpang Potensial dan Komparasi Preferensi Pengguna Potensial terhadap Kajian Pemerintah

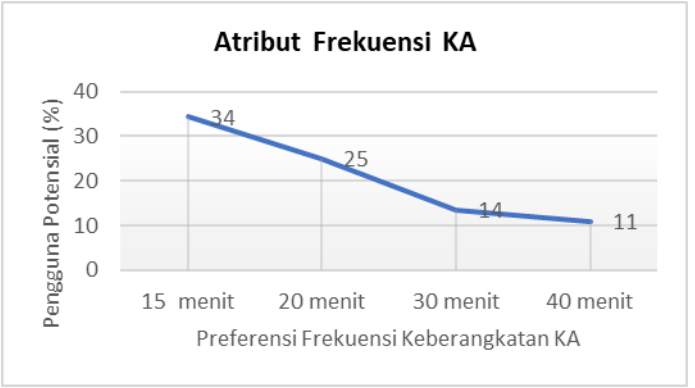
Berbeda dengan prosedur pada tahap pemilihan moda dalam teknik perencanaan transportasi dengan 4-step model yang menggunakan analisis sensitivitas terhadap probabilitas peralihan moda, analisis sensitivitas yang dilakukan dalam penelitian ini hanya mempertimbangkan atribut pelayanan KA yang sesuai dengan preferensi penumpang potensial terhadap penggunaan KA itu sendiri tanpa membandingkan dengan angkutan transportasi yang lain. Suatu atribut dikatakan sensitif terhadap perubahan, jika grafik sensitivitas yang terbentuk memiliki kemiringan yang cukup tajam (curam). Atribut yang sensitif berarti sedikit perubahan yang terjadi pada atribut ini, menyebabkan adanya perubahan yang besar pada probabilitas pemilihan moda. Penggunaan analisis sensitivitas dimaksudkan untuk memahami perubahan jumlah penumpang potensial yang menggunakan angkutan kereta api seandainya dilakukan perubahan nilai pada preferensi mereka secara gradual. Analisis sensitivitas dilakukan dengan menggunakan data preferensi penumpang terhadap atribut pelayanan. Adapun prosedur analisis sensitivitas dilakukan sebagai berikut.

a. Mengidentifikasi preferensi pengguna potensial terhadap atribut-atribut pelayanan kereta api.
b. Melihat tingkat pengaruh dari masing-masing pilihan atribut terhadap jumlah penumpang potensial menggunakan analisis *crosstab. Crosstab* digunakan untuk menganalisis perubahan jumlah pengguna potensial KA berdasarkan preferensi mereka.
c. Mengurutkan nilai atribut sesuai kelompok perubahan.

Atribut pelayanan yang digunakan untuk menjawab analisis sensitivitas diidentifikasi berdasarkan faktor ada tidaknya hubungan antara karakteristik responden dengan bentuk preferensinya. Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, atribut pelayanan yang dianalisis yaitu frekuensi keberangkatan KA, waktu tempuh KA, dan biaya perjalanan KA (Tarif).

a. Sensitivitas Terhadap Frekuensi Keberangkatan KA

Hasil analisis survei primer mengenai kesediaan menggunakan angkutan KA dengan preferensi sebagai syarat menunjukkan bahwa kesediaan berpindah oleh penumpang potensial dengan syarat frekuensi keberangkatan KA dapat dilihat pada grafik di Gambar 11 berikut.



Gambar 11. Sensitivitas Penggunaan KA berdasarkan Preferensi Frekuensi KA

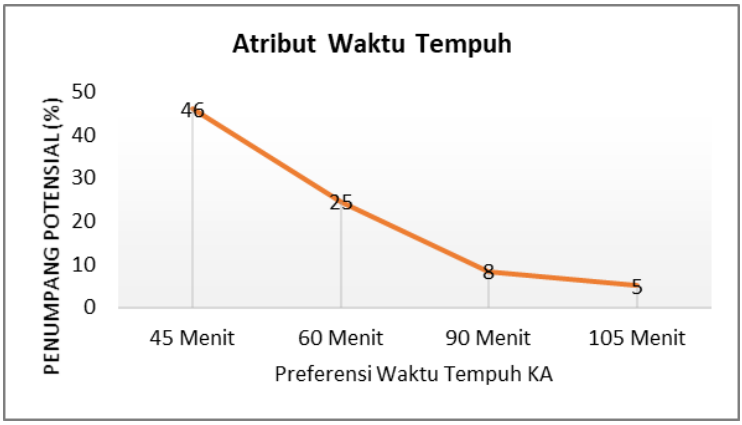
Berdasarkan grafik pada Gambar 11 terlihat bahwa atribut frekuensi keberangkatan KA memiliki sensitivitas yang cukup besar terhadap penggunaan KA apabila dilakukan perubahan waktu. Arah kemiringan garis menunjukkan bahwa semakin tinggi interval waktu kedatangan antar KA, maka semakin rendah pula probabilitas penggunaan KA oleh penumpang potensial. Perubahan penggunaan KA berdasarkan atribut frekuensi KA dijelaskan pada Tabel 6 di bawah ini.

Tabel 6. Sensitivitas Jumlah Penumpang terhadap Perubahan Frekuensi KA

	Frekuensi KA	Hasil
Preferensi penumpang potensial	Setiap 15 menit	Apabila atribut frekuensi keberangkatan KA setiap 15 menit, maka probabilitas penggunaan KA oleh penumpang potensial akan bertambah sebanyak 34%. Selain itu, penambahan penumpang masih akan terjadi dengan asumsi bahwa penumpang potensial yang memiliki preferensi >15 menit pasti akan menggunakan KA.
	Setiap 20 menit	Apabila atribut pelayanan setiap 20 menit ini diberlakukan, maka akan ada pengguna potensial sebesar 25%. Penambahan sebesar 25% penumpang masih akan memungkinkan. Penambahan 25% tersebut berasal dari penumpang potensial yang memiliki preferensi setiap 30 dan 40 menit. Namun, pemberlakuan frekuensi keberangkatan KA setiap 20 menit juga akan menurunkan probabilitas penggunaan KA sebesar 34%.
	Setiap 30 menit	Dengan frekuensi keberangkatan KA setiap 30 menit, diperkirakan probabilitas penggunaan KA oleh penumpang potensial adalah sebanyak 14%. Sedangkan, probabilitas tidak menggunakan angkutan KA oleh penumpang potensial adalah sebesar 59%.
	Setiap 40 menit	Berdasarkan survei preferensi pengguna potensial diperoleh bahwa probabilitas penggunaan angkutan KA dengan frekuensi keberangkatan setiap 40 menit hanya akan digunakan oleh 11% responden dan probabilitas tidak menggunakan KA sebanyak 73%

b. Sensitivitas Terhadap Waktu Tempuh KA

Berdasarkan hasil analisis preferensi penumpang potensial, diketahui bahwa seluruh responden bersedia menggunakan angkutan KA apabila atribut waktu tempuh KA selama rentang waktu 45-90 menit. Untuk mempermudah melihat sensitivitas perubahan waktu tunggu terhadap probabilitas pengguna angkutan KA, dapat dilihat pada Gambar 12 di bawah ini.



Gambar 12. Sensitivitas Perubahan Jumlah Penumpang terhadap Waktu Tempuh

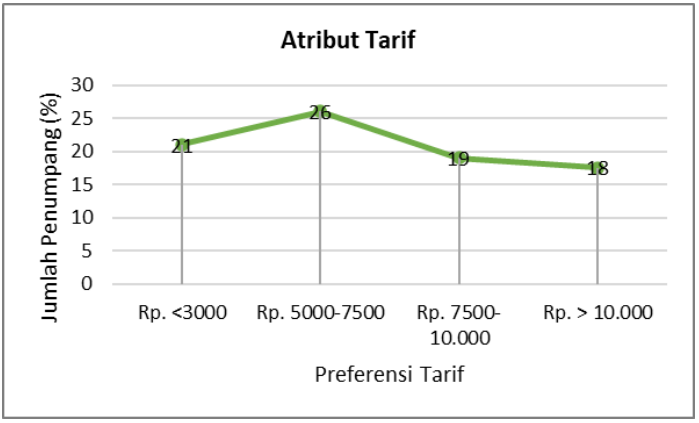
Gambar 12 menunjukkan bahwa sensitivitas perubahan probabilitas penggunaan KA sangat besar apabila dilakukan perubahan pada atribut waktu tempuh. Arah kemiringan garis menunjukkan semakin lama waktu tempuh KA, maka semakin rendah pula probabilitas pengunaan KA oleh penumpang potensial. Perubahan probabilitas penggunaan KA berdasarkan atribut waktu tempuh dijelaskan lebih lanjut pada Tabel 7 di bawah ini.

Tabel 7. Sensitivitas Perubahan Waktu Tempuh KA

	Waktu Tempuh	Hasil
Preferensi Masyarakat	45 Menit	Preferensi masyarakat untuk atribut pelayanan waktu tempuh, sebanyak 46% bersedia menggunakan angkutan KA apabila waktu tempuh mencapai tujuan selama 45 menit. Dapat dikatakan bahwa 100% dari 168 responden bersedia menggunakan KA apabila waktu tempuh selama 45 menit.
	60 Menit	Apabila atribut waktu tempuh KA selama 60 menit, maka akan ada sebanyak 28% responden yang akan menggunakan angkutan KA tersebut karena responden dengan preferensi waktu tempuh 90 dan 105 menit akan tetap bersedia menggunakan KA dengan waktu tempuh 60 menit. Akan tetapi, sebanyak 46% penumpang potensial tidak akan menggunakan KA sehingga dapat dikatakan angkutan KA akan kehilangan 46% penumpang potensial.
	90 Menit	Atribut waktu tempuh selama 90 menit hanya akan digunakan oleh 8% responden. Hanya responden yang memiliki preferensi waktu tempuh selama 90 dan 105 menit yang akan bersedia mengunakan KA tersebut, sedangkan penumpang potensial dengan preferensi waktu tempuh 45 dan 60 menit tidak akan menggunakan angkutan KA. Sehingga dapat disimpulkan bahwa angkutan KA akan kehilangan probabilitas penggunaannya sebanyak 74% penumpang potensial.
	105 Menit	105 menit merupakan atribut waktu tempuh yang terlama, sehingga probabilitas penggunaa KA hanya sebanyak 5% dari penumpang potensial. Sehingga, dapat dikatakan bahwa sebanyak 82% penumpang potensial tidak akan menggunakan angkutan KA Manado-Bitung

c. Sensitivitas Terhadap Biaya Perjalanan

Berdasarkan perubahan selisih tarif dari hasil analisis preferensi penumpang potensial, dapat dijelaskan bahwa selisih tarif yang ada tidak mempengaruhi perubahan jumlah penumpang potensial secara signifikan. Maka dapat disimpulkan, perubahan tarif baik pengurangan atau penambahan sebesar Rp 5.000 tidak akan mempengaruhi jumlah penumpang potensial secara signifikan. Selengkapnya dijelaskan pada Gambar 13 di bawah ini.



Gambar 13. Sensitivitas Jumlah Penumpang terhadap Perubahan Tarif

Arah kemiringan garis pada Gambar 13 menunjukkan adanya perubahan probabilitas penggunaan KA apabila dilakukan perubahan pada tarif, namun perbedaan jumlah pada masing-masing alternatif tarif tidak signifikan. Atribut tarif merupakan salah satu atribut pelayanan yang tingkat sensitifitasnya sangat rendah. Hal ini dilihat dari perubahan arah garis dimana probabilitas penggunaan KA oleh penumpang potensial dengan nominal tarif Rp 5.000-7.500 lebih banyak dibandingkan <Rp 3.000. Arah kemiringan garis juga tidak terlalu curam yaitu selisih terbesar pengguna potensial antar tarif rencana tidak mencapai 10%. Maka, dapat disimpulkan bahwa

atribut tarif memiliki tingkat sensitifitas yang rendah sehingga perubahan yang dilakukan terhadap atribut ini tidak akan mempengaruhi penggunaan angkutan KA oleh penumpang potensial secara signifikan.

KESIMPULAN

Studi ini menunjukkan bahwa layanan KA koridor Manado-Bitung lebih diutamakan sebagai KA perkotaan yang nantinya akan melayani Kota Manado, Kabupaten Minahasa Utara, dan Kota Bitung dimana masalah transportasi akan meningkat pergerakannya sebagai dampak dari kegiatan KAPET dan KEK di wilayah tersebut. Permintaan KA penumpang dinilai nantinya akan meningkat dengan adanya pengoperasian kereta api yang terintegrasi dengan pengembangan wilayah. Pengintegrasian tersebut nantinya akan ikut meningkatkan perkembangan guna lahan untuk perumahan dan pemukiman. Mekanisme pengoperasian KA seperti ini dapat digunakan untuk menyerap manfaat pengembangan jalur KA sebagai dampak dari perkembangan KEK dan KAPET Manado-Bitung.

Berdasarkan hasil observasi di lapangan dan analisis data, beberapa hal yang dapat disimpulkan dari temuan studi ini adalah sebagai berikut.

1. Preferensi penumpang potensial terhadap bentuk pelayanan yang diinginkan adalah pelayanan KA yang menjamin keamanan penumpang, memprioritaskan kenyamanan dengan bentuk kenyamanan yang diinginkan yaitu tidak berdesakan dan tersedia gerbong khusus bagi wanita. Preferensi waktu perjalanan yang menjadi pertimbangan bagi penumpang potensial adalah frekuensi keberangkatan KA nantinya, responden menginginkan frekuensi keberangkatan KA maksimal setiap 40 menit. Namun, dominan responden menginginkan frekuensi keberangkatan setiap 15 menit. Preferensi biaya perjalanan yang didasari keinginan membayar penumpang potensial dalam menggunakan angkutan KA nantinya, jumlah biaya yang bersedia dibayarkan oleh penumpang potensial adalah Rp 5.000.

2. Preferensi atribut pelayanan seperti frekuensi keberangkatan KA, waktu tempuh dan tarif KA merupakan tiga atribut pelayanan yang pemilihannya dipengaruhi oleh karakteristik sosioekonomi dan pergerakan. Sehingga, ketiga atribut pelayanan kereta api tersebut disimpulkan menjadi 3 (tiga) atribut yang dijadikan pertimbangan bagi penumpang potensial sebelum menggunakan angkutan kereta api nantinya.
3. Sensitivitas penggunaan KA dapat dijadikan dasar dalam memprediksi jumlah *demand* berdasarkan preferensi atribut pelayanan KA nantinya. Selain prediksi *demand*, sensitivitas juga dapat menjadi masukan dalam perencanaan pola operasional dari segi atribut pelayanan. Berdasarkan atribut-atribut pelayanan yang diteliti, atribut waktu perjalanan merupakan atribut yang memiliki tingkat sensitivitas tertinggi, baik frekuensi keberangkatan KA maupun waktu tempuh. Ditemukan bahwa semakin lama waktu frekuensi keberangkatan dan waktu tempuh KA, maka semakin rendah probabilitas penggunaan KA tersebut oleh penumpang potensial.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Pembinaan Hukum Nasional. (2014). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 32 tahun 2014 tentang Kawasan Ekonomi Khusus Bitung*. Jakarta: Badan Pembinaan Hukum Nasional.

Badan Perencanaan Daerah Kabupaten Minahasa Utara. (2013). *Peraturan Daerah Kabupaten Minahasa Utara Nomor 01 Tahun 2013 tentang rencana tata ruang Wilayah Kabupaten Minahasa Utara tahun 2013-2033*. Kabupaten Minahasa Utara: Badan Perencanaan Daerah.

Badan Perencanaan Daerah Kota Bitung. (2013). *Peraturan Daerah Kota Bitung No. 11 tahun 2013 tentang rencana tata ruang wilayah Kota Bitung tahun 2013-2033*. Kota Bitung: Badan Perencanaan Daerah.

Badan Perencanaan Daerah Kota Manado. (2014). *Peraturan Daerah Provinsi Sulawesi Utara No. 1 tahun 2014 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Provinsi Sulawesi Utara Tahun 2014 – 2034*. Manado: Badan Perencanaan Daerah Kota Manado.

Badan Perencanaan Daerah Kota Manado. (2016). *Rencana Pembangunan Jangka Panjang (RPJMD) Provinsi Sulawesi Utara 2016-2021*. Kota Manado: Badan Perencanaan Daerah Kota Manado.

Buchari, E., Hidayat, B., & Arliansyah, J. (2015). Karakteristik transportasi Kabupaten Banyuasin, daerah penyangga Kota Palembang. *The 18th FSTPT International Symposium, Unila, Bandar Lampung, August.*

Kementerian PUPR. (2013). *Profil Kota Bitung dan Sekitarnya*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia.

Miro, F. (2005). *Perencanaan transportasi untuk mahasiswa, perencana, dan praktisi.* Jakarta: Erlangga.

Djoeddawi, A.H.S. N., Anwar R.M., & Kusumaningrum, R. (2014). *Model pemilihan moda antara kereta api dan bus rute Makassar-Parepare dengan menggunakan Metode Stated Preference*. Retrieved from https://www.neliti.com/publications/117175/model-pemilihan-moda-antara-

kereta-api-dan-bus-rute-makassarparepare-dengan-meng

Petracia, P., Jansen, F., Lintong, E., & Rumajar, A. L. E. (2012). Studi penentuan tarif tol rencana ruas jalan Manado-Bitung. *Jurnal Sipil Statik*, 1 (1).

Rasyid, M. K., Gaol, B.L., & Kunci, K. (2013). *Dampak penerapan sistem komuter line kereta listrik terhadap kepuasan pelanggan (Studi kasus pada PT. Kereta Api Listrik ac Jabodetabek) (Impact of implementation of system commuter line at electric train on customer satisfaction (Case study at PT. ac electric railway Jabodetabek))*.

Soedrajat, I. (2013). *Ketersediaan infrastruktur dasar sebagai pendukung peningkatan perekonomian suatu wilayah.* Focus group discussion kawasan pengembangan ekonomi terpadu (Kapet). Lombok.

Stephenson, F. J. (1987). *Transportation USA*. Addison-Wesley Pub. Co.

Rangkuti, M., & Agung Sugiri, M. (2014). Kajian karakteristik preferensi penggunaan moda transportasi pribadi dan publik kasus: Perjalanan harian ke Undip Tembalang (Study on the characteristics of preferences personal and public transport mode cases: Travel diary to Undip Tembalang). *Jurnal Teknik P*WK, 3 (4).

Tamin, O. Z. (2000). *Perencanaan dan pemodelan transportasi*. Bandung: ITB.

Wachi, T, D. (2009). *Studi pembangunan sistem kereta api regional wilayah Jawa Tengah di Republik Indonesia*. Jakarta: Departemen Perhubungan.

PEMANFAATAN SUMBERDAYA PERIKANAN TUNA MADIDIHANG (*Thunnus albacares*) SECARA BERKELANJUTAN DI PERAIRAN TELUK BONE

SUSTAINABLE USE OF YELLOWFIN TUNA (Thunnus albacares) FISHERIES RESOURCES IN BONE BAY

Jalil[1*], Achmar Mallawa[2], Faisal Amir[2], Safruddin[2]

[1]Program Studi Magister Manajemen Perikanan, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Terbuka
[2]Program Studi Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan, FIKP Universitas Hasanudin

*jalil@ecampus.ut.ac.id

ABSTRAK

Ikan Tuna Madidihang merupakan salah satu jenis sumberdaya perikanan yang bernilai ekonomis penting sehingga menjadi target penangkapan nelayan. Teluk Bone merupakan salah satu perairan sebagai daerah penangkapan ikan Tuna Madidihang (Thunnus albacares). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis aspek perikanan Thunnus albacares untuk pemanfaatan secara berkelanjutan di Perairan Teluk Bone. Pendekatan deskriptif kualitatif digunakan untuk menganalisis laju eksploitasi, ukuran panjang ikan saat pertama kali tertangkap, ukuran layak tangkap, dan musim penangkapan Tuna Madidihang di perairan Teluk Bone. Hasil penelitian yang diperoleh yaitu laju eksploitasi sebesar 0,76 per tahun, ukuran panjang ikan saat pertama tertangkap di perairan Teluk Bone bagian Utara dan bagian Selatan masing-masing adalah 41,98 dan 77,66 cm, ukuran layak tangkap adalah FL > 101,18 cm, serta musim penangkapan pada Maret, Mei dan Agustus. Penelitian ini menyimpulkan bahwa laju eksploitasi ikan Tuna Madidihang di perairan Teluk Bone menjadi overfishing jika tidak dikelola dengan baik.

Kata Kunci: *eksploitasi, perikanan, populasi, teluk bone, tuna madidihang*

ABSTRACT

Owing to its economic importance, yellowfin tuna (Thunnus albacares) has frequently become one of the dominant species in commercial fishing. Bone Bay is one of the major fishing grounds for yellowfin tuna. This study probes the fishery aspects of yellowfin tuna with the aim of achieving the sustainability of yellowfin tuna fishery in the waters of Bone Bay. Qualitative descriptive research is used to fit into the analysis of exploitation rate, length at first capture, the size of the fish worth catching, and the fishing season of yellowfin tuna in the waters of Bone Bay. Findings show that the exploitation rate is 0,76 a year; the length at first capture ranges between 41,98 and 77,66 cm; the size of the fish worth catching is FL > 101,18 cm; and the fishing season runs in March, May and August. These findings point to a conclusion that, under poor management of fisheries, the exploitation rate of the yellowfin tuna is strongly indicative of overfishing in the waters of Bone Bay.

Key words: *exploitation, fishery, Bone bay, population, yellowfin tuna,*

PENDAHULUAN

Berdasarkan Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan Nomor 18 Tahun 2014, Wilayah Pengelolaan Perikanan Negara Republik Indonesia (WPP-NRI) 713 meliputi Selat Makassar, Teluk Bone, Laut Flores dan Laut Bali. Salah satu sumber daya perikanan yang dimiliki oleh wilayah tersebut adalah ikan pelagis besar jenis Tuna, Cakalang, dan tongkol. Secara umum ikan pelagis besar di WPP-NRI 713 berada pada kondisi *full exploited* dengan indikator warna kuning. Potensi perikanan di perairan wilayah ini sebesar 1.026.599 ton yang di dalamnya terdapat potensi ikan pelagis besar sekitar 419.342 ton dengan jumlah tangkapan yang diperbolehkan (JTB) 83.637 ton. Tingkat pemanfaatan perikanan pelagis besar di WPP-NRI 713 sebesar 0,61 (Suman, Irianto, Satria, & Amri, 2017). Tingkat Pemanfaatan sumberdaya perikanan diseluruh WPP NRI didominasi oleh status *fully-exploited* sebanyak 44%, *overfishing 38%* dan moderat sekitar *18%* (Suman et al., 2018).

Tuna Madidihang (*Thunnus albacares)* merupakan salah satu jenis ikan pelagis besar yang bernilai ekonomis penting, yang merupakan salah satu dari kelompok Tuna Tongkol Cakalang (TTC). Terdapat empat sepesies yang sangat dominan dalam kelompok ini yaitu Cakalang (*Katsuwonus pelamis),* Tuna Madidihang, Tuna Mata Besar (*Thunnus obesus*) dan Tuna Albakor (*Thunnus alalunga*). Keempat spesies tersebut hidup berasosiasi di laut. Ikan Tuna Madidihang atau juga dikenal dengan nama Tuna Ekor Kuning, merupakan salah satu spesies yang banyak di eksploitasi di perairan Teluk Bone. Ikan Tuna Madidihang menjadi target penangkapan nelayan tradisional maupun nelayan modern karena merupakan komoditas ekspor perikanan, sehingga upaya penangkapan dilakukan secara terus menerus. Upaya penangkapan yang dilakukan secara kontinyu tanpa mempertimbangkan kelestariannya berakibat pada punahnya sumberdaya perikanan tersebut.

Badan Pusat Statistik Indonesia secara kontinyu melaporkan 4 jenis ikan tuna, tersebut yaitu, Tuna Albacore, Tuna Mata Besar, Cakalang, dan Tuna Madidihang. Total Produksi keempat spesies utama tersebut pada Tahun 2017 sebesar 125.811 ton terdiri dari Cakalang 60.066 ton (40,74%), Tuna Madidihang 39.913 ton (31,74%), Tuna Mata Besar 22.433 ton (17,83%), dan

Albacore sebanyak 6.994 ton (5,56%) (Ruchimat, Fahmi, Setyadji, & Yunanda, 2018). Rata-rata peningkatan produksi TTC pada tahun 2012 sampai dengan 2017 masing-masing adalah Tuna 1,84%, Cakalang 2,24%, dan Tongkol 2,02%, Sedangkan produksi TTC pada tahun 2016 ke 2017 berturut-turut masing-masing adalah Tuna 7,28 %, Cakalang 6,07%, dan Tongkol -1,10%, (KKP-RI, 2018). Data produksi TTC tersebut menunjukkan adanya peningkatan untuk ikan jenis Tuna sebesar 5,44%, ikan Cakalang sebesar 3,84%, sebaliknya ikan Tongkol mengalami penurunan sebesar 3,12%.

Data hubungan produktivitas penangkapan dan upaya penangkapan ikan Tuna Mmadidihang di perairan Selat Makassar Tahun 1997 sampai dengan Tahun 2011 menunjukkan kecenderungan menurun (Nelwan, Sudirman, Zainuddin, & Kurnia, 2015), Ukuran rata-rata ikan Tuna Madidihang yang tertangkap di Teluk Bone dalam kurun waktu 29 tahun juga mengalami penurunan dari panjang 112 cm pada 1981 menjadi 87,5 cm pada Tahun 2012 (Kantun & Mallawa, 2016). Selanjutnya di jelaskan bahwa penurunan ukuran pertama matang gonad tersebut diduga diakibatkan oleh tingginya laju eksploitasi ikan tersebut.

Kajian laju eksploitasi sumber daya ikan sangat penting dilakukan untuk memastikan tingkat pemanfaatan sumber daya tersebut. Mengacu pada Keputusan Menteri Kelautan dan Perikanan Nomor 50 Tahun 2017, tingkat eksploitasi sumber daya ikan diklasifikasikan atas: 1) eksploitasi *moderat*, jika nilai $E<0,5$, yang bermakna laju eksploitasi masih dapat ditingkatkan; 2) eksploitasi penuh (*fully exploited*), jika nilai $0 \leq E < 1$, yang bermakna upaya penangkapan dipertahankan dengan monitoring ketat; dan, 3) laju eksploitasi lebih (*over exploited*), jika nilai $E \geq 1$ yang bermakna bahwa upaya penangkapan harus dikurangi. Beberapa kajian menunjukkan bahwa laju eksploitasi ikan Tuna Madidihang telah melebihi laju optimum $E = 0,5$.

Ukuran panjang ikan pertama matang gonad, ukuran panjang ikan pertama tertangkap, umur layak tangkap, dan musim penangkapan juga menjadi aspek penting dalam kajian aspek perikanan. Ukuran panjang pertama tertangkap memengaruhi kelestarian sumber daya ikan; diharapkan, ikan yang tertangkap telah melakukan pemijahan minimal satu kali. Oleh karena itu penting mengetahui ukuran pertama matang

gonad untuk menganalisis dan memastikan ikan yang tertangkap telah memijah minimal sekali. Jika hal ini dapat diterapkan maka kelestarian dan keberlanjutan Tuna Madidihang di Teluk Bone dapat terjaga. Umur ikan layak tangkap identik dengan panjang cagak ikan.

Berdasarkan uraian di atas maka penelitian aspek perikanan Tuna Madidihang di perairan Teluk Bone menjadi sangat penting dilakukan. Aspek perikanan tersebut meliputi laju eksploitasi, ukuran ikan pertama tertangkap, ukuran panjang ikan pertama matang gonad, dan musim penangkapannya. Kajian ini menjadi gambaran kondisi potensi sumber daya saat ini serta menggambarkan potensi yang dapat dimanfaatkan secara maksimal dan berkelanjutan.

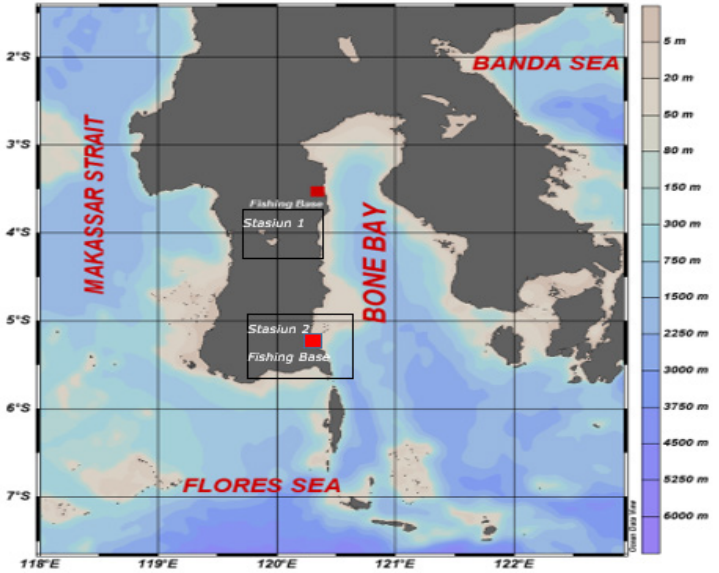
PEMBAHASAN

1. Laju Eksploitasi

Eksploitasi ikan tuna madidihang di perairan Teluk Bone menggunakan pancing ulur, *purse seine* dan rawai tuna. Pada penelitian ini sampel yang terkumpul sebanyak 12.936 ekor ikan Tuna Madidihang yang merupakan hasil tangkapan nelayan yang menggunakan alat tangkap pancing ulur di perairan Teluk Bone. Lokasi Pengambilan sampel terdiri dari dua stasiun (Gambar 1). Stasiun I (sub stasiun 1a di Desa Cimpu Kecamatan Suli dan sub-stasiun 1b di kelurahan Bonepute Kecamatan Larompong Selatan Kabupaten Luwu) dan Stasiun 2 di Lonrae Kecamatan Tanete Riattang Timur Kabupaten Bone. Dengan menggunakan software FISAT II diperoleh laju eksploitasi ikan Tuna Madidihang di perairan Teluk Bone bagian utara 0,74% dan bagian Selatan 0,71%. Dan laju eksploitasi dari gabungan keseluruhan sebesar 0,76% per tahun.

Analisis laju pemanfaatan sumber daya ikan di perairan Teluk Bone dilakukan terhadap data hasil tangkapan dengan menggunakan pancing ulur di Stasiun 1. Data tersebut adalah data yang diperoleh di lokasi selama penelitian yaitu data dari Kelompok Usaha Bersama (KUB) sumber laut sub stasiun 1 di Desa Bopepute, Kecamatan Larompong Selatan, Kabupaten Luwu. Hal ini karena data produksi hasil tangkapan Tuna Madidihang dari Dinas Perikanan Kabupaten Luwu pada tahun 2015 – 2018

digabungkan dengan data Tuna Tongkol Cakalang lainnya sehingga tidak dapat menghitung laju pemanfaatan ikan. Data yang dianalisis adalah hasil tangkapan nelayan menggunakan alat tangkap pancing ulur.



Sumber: Safruddin et al., 2019

Gambar 1. Lokasi Penelitian dan Stasiun Pengambilan Sampel di Perairan Teluk Bone

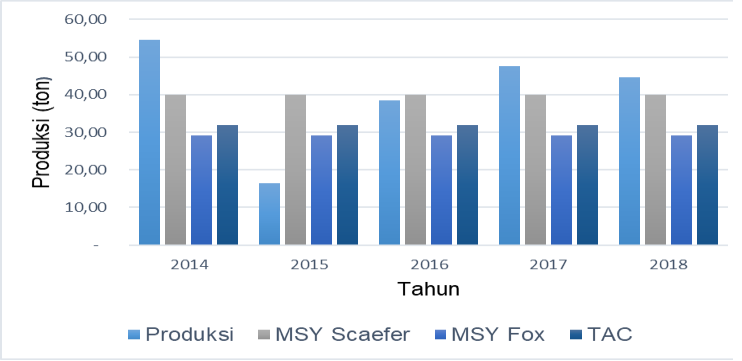
Hasil analisis laju pemanfaatan ikan Tuna Madidihang di Teluk Bone disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Upaya Penangkapan, Produksi Tahunan, dan C/F di Perairan Teluk Bone

Tahun	Upaya (Trip)	Produksi (ton)	Upaya	C/F (Schaefer)	ln C/F (Fox)
2014	724	54,5	724	0,075	-2,587
2015	207	6,51	207	0,080	-2,529
2016	297	8,53	297	0,130	-2,042
2017	241	7,52	241	0,197	-1,624
2018	229	4,55	229	0,195	-1,637
Maximum sustainable yield (MSY) (ton)				58,03	56,79
TAC (ton)				46,43	45,43
Pemanfaatan (%)				86,85	88,76
F_{MSY}				625	819
Tingkat Pemanfaatan				54,36%	41,45%

Sumber: KUB Bonepute 2020, data setelah diolah.

Perbandingan antara tingkat pemanfaatan, *Maximum Sustainable Yeald* (MSY) dan *Total Allowable Catch* (TAC) di perairan Teluk Bone tahun 2015 – 2018 ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan antara Produksi Hasil Tangkapan Aktual, MSY

Hasil analisis laju eksploitasi dalam penelitian ini antara 0,71 – 0,74 per tahun yang berarti nilai laju eksploitasi tersebut > 0,5. Jika dibandingkan dengan kriteria laju eksploitasi yang ditetapkan pada SK Kementerian Kelautan dan Perikanan Nomor 50 Tahun 2017, hasil ini termasuk kategori eksploitasi penuh (*fully eksploted*) dan melebihi jumlah *Maximum Sustainable Yield (MSY) E = 0,5* (Pauly, 1983).

Hasil tersebut tergolong tinggi, jika dibandingkan dengan laju ekploitasi di Selat Makassar 0,68 (Kantun & Amir, 2016), Samudra Atlantik bagian Tengah 0,5 (Zhu, Guoping, Xu, Zhou, & Chen, 2009). Perairan Andaman dan Nicobar 0,62 (Kar, Ramalingam, Govindaraj, & Prasad, 2012), Laut Banda 0,67, Perairan Sekitar Jawa Barat (Pelabuhan Ratu) sebesar 0,68 (Nurdin, Sondita, Yusfiandayani, & Baskoro, 2016), perairan Pantai Timur India yaitu sebesar 0,32 (Rohit, Rao, & Rammohan, 2012), Perairan Bagian Timur dan bagian Tengah Samudra Pasifik 0,46 (Zhu, Gupoing, Dai, & Liu, 2011). Namun demikian, tingkat eksploitasi Tuna Madidihang Teluk Bone lebih rendah jika dibandingkan dengan laju eksploitasi Tuna Madidihang di perairan Laut Oman (0,76 < 0,79) (Kaymaram, Hosseini, & Darvishi, 2014). Hasil ini menunjukkan bahwa beberapa perairan tingkat eksploitasinya telah melebihi tingkat maksimum lestari (E > 0,5).

Laju eksploitasi yang tinggi dapat berpengaruh negatif terhadap kelangsungan hidup populasi ikan Tuna Madidihang. (Rochet, 2009) mengemukakan bahwa pengaruh penangkapan terhadap populasi adalah:

1. Ukuran matang gonad menurun, hal ini dapat mengganggu keberlanjutan populasi karena berkurang ukuran panjang matang gonad, yang mengakibatkan fekunditas akan menurun.
2. Menurunnya ukuran matang gonad mengakibatkan kualitas gonad, peluang menetas, dan tingkat kelangsungan hidup larva juga menurun.
3. Musim pemijahan untuk ikan yang berukuran kecil lebih pendek jika dibandingkan dengan ikan yang berukuran besar dan berumur lebih tua.

Kelangsungan hidup larva ikan menurun akibat dari telur yang dihasilkan oleh ikan yang berukuran kecil. Ikan berukuran kecil ini mempunyai kandungan hormon dan cadangan energi

yang rendah, laju pertumbuhan yang lambat, dan ukuran larva saat menetas yang kecil. Selain itu, ikan kecil ini memiliki ketidak mampuan menyesuaikan diri dengan kondisi lingkungan (Nasir, 2018).

Berdasarkan kriteria (Rochet, 2009) hasil perhitungan tekanan penangkapan terhadap populasi 3,17 yang masuk pada kriteria kuat. Oleh karena itu, agar populasi Tuna Madidihang di perairan Teluk Bone dapat tidak *over fishing* diperlukan kebijakan dari semua *stakeholder* agar pemanfaatan sumberdaya tersebut dilakukan secara bertanggung jawab.

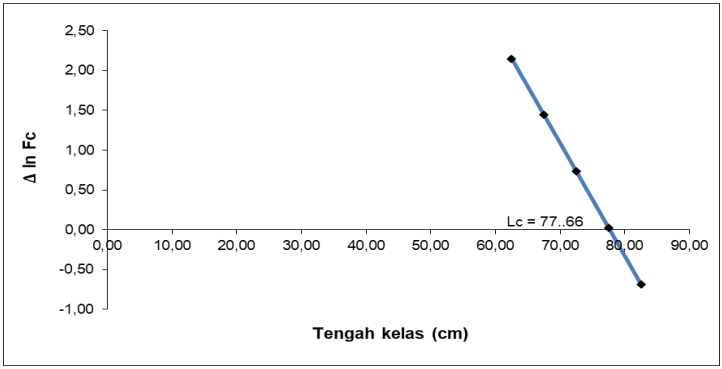
Berdasarkan nilai TAC yang diperoleh pada Tabel 1 yang menggunakan pendekatan Schaefer dan pendekatan Fox diperoleh nilai masing-masing 31,974 dan 29,054 ton per trip pancing ulur. Hal ini diperoleh dari 80% dari MSY masing-masing untuk pendekatan Schaefer dan Fox adalah 39,975 dan 36.318 ton per trip pancing ulur. Tingkat pemanfaatan ikan tuna madidihang di perairan Teluk Bone dengan menggunakan kedua pendekatan tersebut masing-masing adalah 139.3% dan 153% digolongkan sebagai *over exploited.*

Berdasarkan Gambar 2 bahwa produksi hasil tangkapan Tuna Madidihang di Perairan Teluk Bone pada Tahun 2014 dan 2015 masih lebih rendah dari TAC, namun pada 3 tahun terakhir total jumlah produksi tangkapan telah melebihi nilai TAC. Hasil penelitian ini konsisten dengan data KKP-RI bahwa tingkat pemanfaatan ikan pelagis besar di WPP-NRI 713 sebesar 1.13 dari potensi dan JTB sebesar 645.058 dan 516.046 ton per tahun. Nilai tersebut merupakan tingkat pemanfaatan ikan pelagis besar tertinggi jika dibandingkan dengan WPP-NRI lainnya (KKP-RI, 2021). Namun tingkat pemanfaatan di Laut Flores yaitu 55% (Zainuddin, Selamat, Ridwan, Hidayat, & Mallawa, 2015) lebih rendah jika dibandingkan dengan hasil penelitian tersebut.

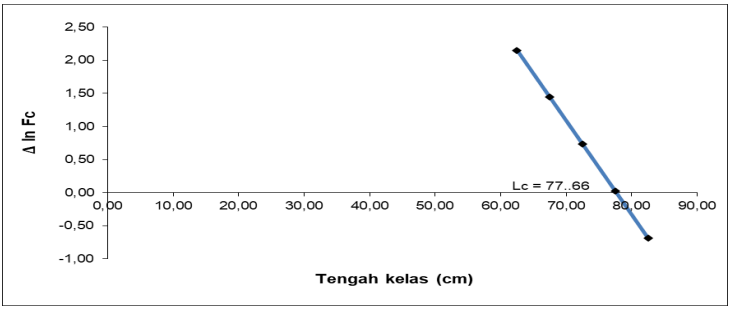
Berdasarkan hasil tersebut maka pengelolaan dan pemanfaatan sumber daya perikanan Tuna Madidihang dan perikanan pelagis besar lainnya sedapat mungkin dapat dikendalikan. Pemanfaatan sumber daya perikanan yang berlebih (*overfishing*) dapat berpengaruh pada banyak aspek, baik pada sumber daya itu sendiri maupun aspek lainnya. Secara biologis, tertangkapnya ikan berukuran besar dapat berpengaruh pada menurunnya kualitas larva yang pada akhirnya berpengaruh terhadap kelangsungan hidup ikan.

2. Ukuran Panjang Ikan Pertama Tertangkap

Ukuran ikan pertama tertangkap (Lc) menggunakan pancing ulur yang mendarat pada Stasiun 1 (Teluk Bone Bagian Utara) dan Stasiun 2 (Teluk Bone Bagian Selatan) masing-masing adalah 41,98 dan 77,66 cm. Kajian terhadap ukuran panjang pertama kali tertangkap merupakan salah satu aspek penting dalam kajian pendugaan stok ikan. Menurut Sparre & Venema (1998) bahwa ukuran panjang pertama ikan tertangkap adalah jika 50% dari panjang ikan yang masuk jaring tertahan; jadi diperoleh dari seleksi alat tangkap. Hal ini berlaku bagi alat tangkap berupa jaring seperti *purse seine*. Namun untuk alat tangkap yang menggunakan pancing, panjang pertama kali ikan tertangkap adalah rata-rata panjang dari total hasil tangkapan (Darondo, Halim, Jabbar, & Wudianto, 2020).



(a)



(b)

Gambar 3. Ukuran Ikan Pertama Kali Tertangkap di Perairan Teluk Bone yang Mendarat pada Masing-Masing Stasiun. (a) Stasiun 1 (Utara) dan (b) Stasiun 2 (Selatan)

Berdasarkan hasil analisis bahwa ukuran panjang ikan Tuna Madidihang pertama tertangkap di perairan Teluk Bone Stasiun 1 (bagian Utara) adalah 77,7 cm dan Stasiun 2 (bagian Selatan) adalah 89,2 cm. Ukuran tersebut lebih kecil jika dibandingkan dengan ukuran panjang pertama matang gonad. Hasil ini lebih besar jika dibandingkan dengan hasil penelitian di Pantai Timur India, bahwa ukuran panjang cagak terkecil yang tertangkap adalah 20 cm (Rohit, Rao, & Rammohan, 2012); sedangkan di perairan Andaman dan Nikobar ukuran terkecil ikan jantan dan ikan betina yang tertangkap adalah 48 cm dan 52 cm (Kar, Ramalingam, Govindaraj, & Prasad, 2012). Demikian juga dengan penelitian di Teluk Mexico masing-masing untuk ikan jantan dan ikan betina mempunyai panjang cagak 62 cm dan 68 cm (Lang, Falterman, Kitchens, & Marshall, 2017). Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Darondo, Halim, Jabbar, & Wudianto, (2020) di Teluk Bitung yang menggunakan 4 alat tangkap yang berbeda masing-masing adalah purse seine Lc = 47, 32, *hand line* Lc = 120 cm, *pole and line* Lc= 120 cm, serta *long line* Lc = 127 cm.

Ukuran Panjang pertama ikan tertangkap berbeda pada beberapa kajian. Perbedaan tersebut disebabkan oleh selektivitas alat tangkap yang digunakan. Namun demikian perlu menjadi perhatian agar ikan yang tertangkap dengan alat tertentu merupakan ikan yang memenuhi syarat secara biologis.

Salah satu syarat biologis yang harus dipenuhi adalah ikan tersebut adalah ikan yang telah/pernah melakukan pemijahan. Hal ini dapat dilakukan dengan membandingkan antara ukuran pertama memijah dengan ukuran pertama kali tertangkap.

Ukuran ikan pertama kecil yang ditemukan di perairan Teluk Bone khususnya di lokasi penelitian, disebabkan oleh lokasi penangkapan berada disekitar rumpon. Pada daerah rumpon tersebut merupakan tempat berkumpulnya ikan Tuna Madidihang dalam berbagai ukuran (Morgan, 2011). Hal ini didukung oleh alat tangkap *hand line* yang digunakan, dengan panjang tali utama hanya sekitar 50 m. Ikan yang berada disekitar permukaan ukurannya lebih kecil jika dibandingkan dengan ikan pada daerah kedalaman > 100 m (Kantun, Darris, & Arsana, 2018).

3. Ukuran Ikan Layak Tangkap

Berdasarkan hasil analisis ukuran pertama matang gonad diperoleh Lm=101,18 cm sehingga ukuran layak tangkap adalah ikan yang memiliki panjang cagak FL>101,18 cm. Persentase sampel ikan yang layak tangkap di Stasiun 1 (perairan Teluk Bone Bagian Utara) sebanyak 3.477 ekor (33,54%) yang tidak layak tangkap sebanyak 6.889 ekor (66,46%) dari 10.366 sampel. Pada Stasiun 2 (perairan Teluk Bone bagian Selatan) ikan yang layak tangkap sebanyak 1.573 (61,21%) dan tidak layak tangkap sebanyak 997 ekor (38,79%) dari 2.570 ekor sampel.

Ikan yang layak tangkap adalah ikan yang sudah pernah memijah minimal satu kali sehingga dapat memberikan rukrutmen bagi sumber daya tersebut. Pendugaan aspek biologi dan dinamika populasi merupakan dasar untuk menentukan ukuran ikan yang layak tangkap. Pendugaan ukuran pertama kali matang gonad adalah cara yang digunakan untuk mengetahui perkembangan populasi ikan bilamana ikan akan memijah, baru memijah, atau sudah selesai memijah (Effendie, 2002; Yudasmara, 2014). Penurunan ukuran populasi seiring dengan berjalannya waktu dapat terjadi karena ikan yang tertangkap adalah ikan yang belum memijah atau ikan yang akan memijah, sehingga perlu pengaturan penggunaan alat tangkap yang selektif (Najamuddin, 2014).

Mengacu pada hasil perhitungan panjang pertama matang gonad (Lm = 93,45 cm), maka ikan Tuna Madidihang

layak tangkap di perairan Teluk Bone harus lebih besar dari panjang pertama kali matang gonad nilai tersebut. Apabila yang ditangkap adalah ikan muda atau ikan yang belum memijah maka akan berpengaruh terhadap keberlanjutan dan kelestarian sumber daya perikanan Tuna Madidihang di perairan Teluk Bone.

4. Musim Penangkapan

Analisis musim penangkapan menggunakan data jumlah alat tangkap dan jumlah produksi primer yang diperoleh. Hasil analisis musim penangkapan ikan Tuna Madidihang di Perairan Teluk Bone disajikan pada Tabel 2. Berdasarkan Tabel 2 Nilai Indeks Musim penangkapan tertinggi terjadi pada bulan September dan terendah pada bulan Oktober.

Tabel 2. Jumlah Upaya Penangkapan, Produksi, dan Indeks Musim Penangkapan di Perairan Teluk Bone Tahun 2018

Bulan	Upaya (unit)	Produksi (Ton)	IMi (%)
Januari	0	0	
Februari	0	0	
Maret	10	2,305	138,634
April	13	1,618	74,857
Mei	15	5,353	214,637
Juni	9	0,884	59,076
Juli	18	2,305	77,019
Agustus	11	2,467	134,888
September	8	6,194	465,671
Oktober	9	0,527	35,218
November	0	0	0
Desember	0	0	0
			1200,000

IMi = Indeks Musim Penangkapan ke-*i*
Sumber: KUB Bonepute (2020)

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 2, maka musim penangkapan Tuna Madidihang di perairan Teluk Bone (IMi>100) adalah pada bulan Maret, Mei, Agustus, dan September. Sedangkan bulan lainnya April, Juni, Juli, dan Oktober digolongkan sebagai bukan musim penangkapan (IMi < 100).

Hasil penelitian ini berbeda dengan hasil penelitian di WPP NRI 573, dengan musim penangkapan tertinggi pada bulan Januari – Februari dan bulan Mei – Juli (Nurhayati, Wisudo, & Purwangka, 2018). Hasil penelitian lainnya melaporkan bahwa musim penangkapan Tuna Madidihang di perairan Laut Maluku dan Laut Sulawesi yang didaratkan di Pelabuhan Perikanan Samudera Bitung terjadi pada bulan Januari, Juli, Agustus, September, Oktober, dan November (Setiawan, Wenno, & Kayadoe, 2016).

Hasil yang sama ditemukan pada perairan Pulau Morotai, yaitu musim puncak penangkapan ikan tuna madidihang terjadi pada bulan Maret dan Bulan Juni (Sofiati & Alwi, 2019), Demikian pula musim penangkapan ikan Tuna Madidihang di Labuhan Lombok, musim penangkapan terjadi sejak April dan mencapai puncak pada bulan Juni, serta puncak kedua terjadi pada bulan Oktober (Setyadji, Hartaty, & Mardlijah, 2016).

Perbedaan musim penangkapan ikan Tuna Madidihang di beberapa wilayah perairan disebabkan oleh adanya pola migrasi secara horizontal dari ikan Tuna Madidihang tersebut. Hal ini didukung oleh hasil penelitian (Safruddin et al., 2019) bahwa Teluk Bone merupakan zona yang potensial sebagai lokasi penangkapan ikan pelagis besar pada bulan April – September di mana musim puncak penangkapan terjadi pada bulan Mei setiap tahun. Oleh karena itu, untuk optimalisasi hasil tangkapan maka pengetahuan tentang pola migrasi ikan khususnya ikan tuna sangat penting diketahui oleh nelayan dan *stake holder* lainnya (Safruddin et al., 2019; 2020).

5. Kondisi Stock Ikan Tuna Madidihang di Perairan Teluk Bone

Berdasarkan hasil analisis yang diperoleh pada aspek Biologi (Jalil, Mallawa, Amir, Safruddin, 2020), aspek dinamika populasi (Jalil et al., 2020a) dan aspek perikanan ikan Tuna Madidihang di perairan Teluk Bone Disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Analisis Aspek Biodinamika Populasi Ikan Tuna di Perairan Teluk Bone berdasarkan Stasiun

Parameter	Wilayah Perairan teluk Bone (Stasiun)	
	Utara (1)	Selatan (2)
I. Aspek Biologi		
1. Panjang rata-rata (cm)	84,36 (20 – 192)	97,14 (60 – 162)
2. Berat (kg)	14,43 (0,3 – 99,21)	27,79 (5,61 – 97,35
3. Pola Pertumbuhan	Alometrik Negatif	Alometrik Negatif
4. Faktor Kondisi	1,93 (0,3 – 13,0)	2,97 (1,24 – 8,92)
5. Tingkat Kematangan Gonad	Active reproductive	-
6. Panjang Pertama Matang gonad (Lm) (cm)	93,45	-
7. Fekunditas (butir)	11,781 – 198.038	-
8. Jenis Makanan	Ikan, cumi-cumi, kepiting.	-
II. Aspek Dinamika Populasi		
1. Kelompok Umur (kohor)	4	**3**
2. Parameter pertumbuhan - Panjang asimtot ($L\infty$) (cm) - Koefisien Pertumbuhan (K) - Panjang pada t= 0 (t_0) (cm)	 217,6 0,326 -0,37	 191,8 0,358 -0,28
3. Laju mortalitas - Alami (M) - Penangkapan (F) - Total (Z)	 0,55 1,54 2,08	 0,47 1,15 1,62
III. Aspek Perikanan		
1. Laju Eksploitasi	0,74	0,71
2. LC (cm)	41,98	77,66
3. Ukuran Ikan layak tangkap	> 101,18	-
4. Musim Penangkapan	Maret, Mei, Agt, Sept.	-

Keterangan: - = tidak dihitung.

Berdasarkan data pada Tabel 3 dapat dijelaskan beberapa hal berkaitan dengan stok ikan Tuna Madidihang di perairan Teluk Bone. Ikan Tuna Madidihang yang tertangkap diperairan Teluk Bone umumnya mempunyai ukuran lebih kecil dibandingkan dengan di beberapa perairan lainnya. Namun demikian, kisaran ukuran panjang dan berat ikan yang tertangkap terbanyak pada ukuran antara 20 – 192 cm dan 0,3 – 99,21 kg. Hal ini menunjukkan bahwa nelayan pancing ikan Tuna Madidihang kurang selektif. Meskipun secara umum ikan yang tertangkap terbanyak pada kisaran 85 – 105 cm. Ukuran tersebut lebih kecil daripada ukuran Lm = 101,18 cm. Hal ini menujukkan ikan yang tertangkap lebih kecil dari ukuran dewasa atau belum pernah melakukan pemijahan.

KESIMPULAN

Berdasarkan uraian di atas dapat disimpulkan bahwa:

1. Laju eksploitasi di Teluk Bone bagian utara 0,74% dan bagian selatan 0,71%. Angka tersebut berada di sekitar titik eksploitasi maksimum sehingga diperlukan kebijakan pengelolaan yang tepat untuk menjaga kelestarian sumber daya Ikan Tuna Madidihang di Teluk Bone,
2. Panjang ikan Tuna Madidihang yang tertangkap di perairan Teluk Bone umumnya didominasi oleh ikan ukuran 100 cm, sehingga ikan Tuna Madidihang yang tertangkap pada umumnya telah matang gonad atau layak tangkap.
3. Musim penangkapan ikan Tuna Madidihang di perairan Teluk Bone terjadi pada bulan Maret, Mei, dan Agustus.

DAFTAR PUSTAKA

Darondo, F. A., Halim, S., Jabbar, M. A., & Wudianto. (2020). Struktur Ukuran, Pola Pertumbuhan, dan Rata-rata Ukuran Panjang Pertama Kali Tertangkap Ikan Tuna Madidihang (Thunnus albacares) Di Perairan Bitung. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Perikanan Tangkap*, *5*(1), 7–17.

Effendie, M. I. (2002). *Biologi Perikanan*. Yogyakarta: Yayasan Pustaka Nusatama.

Jalil, Mallawa, A., Amir, F., & Safruddin. (2020a). Dynamics Population of Yellow fin Tuna Thunnus albacares in Bone Bay, Indonesia, *International Journal of Advanced Science and Technology,* 4 (29), 10898-10908.

Jalil, Mallawa, A., Amir, F., & Safruddin. (2020b). Size Composition and Length-Weight relationships of the Yellowfin Tuna (Thunnus albacares) in Bone Bay, *E3S Web of Conferences.* 153.

Kantun, W., & Amir, M. F. (2016). Aspek Biologi dan Komposisi Hasil Tangkapan Pancing Ulur Di Perairan Teluk Bone. *Jurnal Balik Diwa, 7*(1), 24–32.

Kantun, W., Darris, L., & Arsana, W. S. (2018). Komposisi Jenis dan Ukuran Ikan Yang Tertangkap Pada Rumpon Dengan Pancing Ukur di Selat Makassar. *Marine Fisheries : Journal of Marine Fisheries Technology and Management*. https://doi.org/10.29244/jmf.9.2.157-167.

Kantun, W., & Mallawa, A. (2016). Biologi Tuna Madidihang (Thunnus Albacares) (I). Yogyakarta. Gadjah Mada University Press.

Kar, A. B., Ramalingam, L., Govindaraj, K., & Prasad, G. V. A. (2012). Study of the Growth and Population Parameters of Yellowfin Tuna (Thunnus albacares) in the Andaman and Nicobar Waters Based on the Length Frequency Data. (IOTC-2012-WPTT14-30 Rev_1).

Kaymaram, F., Hosseini, S. A., & Darvishi, M. (2014). Estimates of Length-Based Population Parameters of Yellowfin Tuna (Thunnus albacares) in the Oman Sea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Science*, *14*, 101–111. https://doi.org/10.4194/1303-2712-v14.

KUB Bonepute. [Kelompok Usaha Bersama] Bonepute. (2020). Buku Catatan Pembelian Ikan. (Tidak dipublikasi).

KKP-RI. [Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia]. (2018). Kelautan dan Perikanan dalam Angka Tahun 2018 (Marine and Fisheries in Figures 2018) (R. R. Damanti, D. Arriyana, & R. Rahardian (eds.)). DKP RI. Retrieved from www.dkp.go.id.

KKP-RI. [Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia]. (2021). JTB Ikan Pelagis Besar per WPP. Satu Data KKP. Retrieved from https://statistik.kkp.go.id/

Lang, E. T., Falterman, B. J., Kitchens, L. L., & Marshall, C. D. (2017). Age and Growth of Yellowfin Tuna (Thunnus Albacares in The Northern Gulf Mexico. *SCRS/2016/049 Sci Pap. ICCAT*, *73*(1), 423–433.

Morgan, A. C. (2011). Fish Aggregating Devices and Tuna: Impacts and Management Options. *Ocean Science Division, Pew Environment Group*, *Washington* (July), 1–20.

Najamuddin. (2014). Pemanfaatan Sumberdaya Ikan Layang (Decapterus spp) Berkelanjutan di Perairan Selat Makassar. Bogor: IPB Press.

Nasir, N. A. (2018). Effects of fishing on fish population structure and their ecology. The Fish Project. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18174.69442

Nelwan, A. F. P., Sudirman, Zainuddin, M., & Kurnia, M. (2015). Produktivitas Penangkapan Ikan Pelagis Besar Menggunakan Pancing Ulur yang Berpangkalan di Kabupaten Majene. *Marine Fisheries*, *6*(2), 129–142.

Nurdin, E., Sondita, M. F. A., Yusfiandayani, R., & Baskoro, M. S. (2016). Growth and Mortality Parameters of Yellowfin Tuna (Thunnus Ibacares) in Palabuhanratu Waters, West Java (Eastern Indian Ocean). *AACL Bioflux*, *9*(3), 741–747.

Nurhayati, M., Wisudo, S. H., & Purwangka, F. (2018). Produktivitas dan Pola Musim Penangkapan Tuna Madidihang (Thunnus albacares) di Wilayah Pengelolaan Perikanan 573. *Akuatika Indonesia*, *3*(2), 127. https://doi.org/10.24198/jaki.v3i2.23400

Pauly, D. (1983). Some Simple Methods for The Assessment of Tropical Fish Stocks. In *FAO. Fisheries Technical Paper*.

Rochet, M. (2009). Effects of Fishing on the Population. In T. Jakobsen, M. Fogarty, B. A. Megrey, & E. Moksness (Eds.), *Fish Reproductive Biology: Implications for Assessment and Management*, 172–204. Wiley-Blackwell.

Rohit, P., Rao, G. S., & Rammohan, K. (2012). Age, Growth and Population Structure of The Yellowfin Tuna Thunnus albacares (Bonnaterre, 1788) Exploited Along The East Coast of India. *Indian Journal Fisheries, 59*(1), 1–6.

Ruchimat, T., Fahmi, Z., Setyadji, B., & Yunanda, T. (2018). Indonesia National Report to the Scientific Committee of the Indian Ocean Tuna Commission, 1–28.

Safruddin, Aswar, B., Hidayat, R., Saiful, Dewi, Y. K., Umar, M. T., Farhum, S. A., Zainuddin, M., & Mallawa, A. (2020). Pola Migrasi Ikan Pelagis Besar di Wilayah Pengelolaan Perikanan 713. *Simposium Nasional VII Kelautan Dan Perikanan*, *713*(01), 195–202.

Safruddin, Aswar, B., Hidayat, R., Saiful; Dewi, Y. K., Umar, M. T., Farhum, S. A., Zainuddin, M., & Mallawa, A. (2019). The fishing ground potential zones of large pelagic fish in the Gulf of Bone. *Prosiding Simposium Nasional Kelautan Dan Perikanan VI Universitas Hasanuddin, Makassar, 21 Juni 2019*, *November*, 331–340.

Setiawan, U., Wenno, J., & Kayadoe, M. E. (2016). Laju tangkap dan musim penangkapan madidihang (Thunnus albacares) dengan tuna hand line yang didaratkan di Pelabuhan Perikanan Samudera Bitung. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Perikanan Tangkap*, *2*(4), 147–153.

Setyadji, B., Hartaty, H., & Mardlijah, S. (2016). *The seasonal variability of cpue and catch-at-size distribution of troll and handline tuna fisheries landed*. *22*(1), 53–60.

Sofiati, T., & Alwi, D. (2019). The productivity and the pattern of yellowfin tuna (Thunnus albacares) fishing season in Morotai Island waters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *370*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/370/1/012057

Sparre, P., & Venema, S. C. (1998). Introduction to tropical fish stock assessment Part 1: Manual (Part I Man). FAO.

Suman, A., Irianto, H. E., Satria, F., & Amri, K. (2017). Potensi dan Tingkat Pemanfaatan Sumber Daya Ikan Di Wilayah Pengelolaan Perikanan Negara Republik Indonesia (Wpp Nri) Tahun 2015 Serta Opsi Pengelolaannya. *Jurnal Kebijakan Perikanan Indonesia*, *8*(2), 97. https://doi.org/10.15578/jkpi.8.2.2016.97-100.

Suman, A., Satria, F., Nugraha, B., Priatna, A., Amri, K., & Mahiswara. (2018). Status stok sumber daya ikan tahun 2016 di Wilayah Pengelolaan Perikanan Negara Republik Indonesia (WPP NRI) dan alternatif pengelolaannya. *Jurnal Kabijakan Perikanan Indonesia*, *10*(November), 107–128.

Yudasmara, G.A. (2014). Biologi Perikanan. Yogyakarta. Explantaxia.

Zainuddin, M., Selamat, M. B., Ridwan, M., Hidayat, S., & Mallawa, A. (2015). Estimasi potensi dan pemetaan zona potensi penangkapan ikan tuna di Laut Flores : Perspektif penginderaan jauh dan sistem informasi geografis. *Jurnal Iktiologi Indonesia*, *15*(2), 129–141.

Zhu, Guoping, Xu, L., Zhou, Y., & Chen, X. (2009). Growth and mortality rates of big eye tuna Thunnus obesus (Perciformes: Scombridae) in the central Atlantic Ocean. *Revista de Biologia Tropical*, *57*(1–2). https://doi.org/10.15517/rbt.v57i1-2.11292.

Zhu, Gupoing, Xu, L., Dai, X., & Liu, W. (2011). Growth and mortality rates of yellowfin tuna, Thunnus albacares (Perciformes: Scombridae), in the eastern and Central Pacific Ocean. *Zoologia*, *28*(2), 199–206. https://doi.org/10.1590/S1984-46702011000200007.

BIODATA PENULIS

Fitria Amastini, S.Kom., M.T.I. lahir di Jakarta. Pendidikan Strata 1 bidang Teknik Informatika diperoleh dari Universitas Multimedia Nusantara (UMN) pada tahun 2015, dan dilanjutkan dengan pendidikan S2 Magister Teknologi Informasi diperoleh dari Universitas Indonesia (UI) pada tahun 2020. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Keamanan Sistem Informasi, Data Warehouse, Manajemen Layanan Teknologi Informasi, dan Manajemen Risiko dan Audit Sistem Informasi. Bidang minat penelitian adalah di bidang *Data Mining*, *Learning Analytics*, dan *Artificial Intelligence/Machine Learning*. Email yang dapat dihubungi adalah **amas@ecampus.ut.ac.id**

Dwinanda Kinanti Suci Sekarhati, S. Kom., M.T.I. lahir di Tangerang pada tahun 1994. Jenjang Pendidikan Kinanti dimulai dari Pendidikan Strata 1 bidang Teknik Informatika diperoleh dari Universitas Bina Nusantara (BINUS) pada tahun 2016 dan dilanjutkan dengan pendidikan S2 Magister Teknologi Informasi yang diperoleh dari Universitas Indonesia (UI) pada tahun 2020. Saat ini, Kinanti sudah mempunyai pengalaman mengajar mulai dari mata kuliah *Human-Computer Interaction* (HCI), *Web Programming,* dan *Mobile Programming* di Universitas BINUS sejak Maret 2021. Selain mengajar, Kinanti juga sudah membimbing beberapa skripsi dan penelitian Mahasiswa yang berbasis studi kasus pada suatu organisasi. Kinanti pun juga melakukan penelitian di bidang yang diminati yaitu bidang HCI, *Learning Analytics*, dan pemrograman. Dalam kesehariannya, Kinanti bisa dihubungi melalui email **nanda.kinanti@binus.ac.id**

Dra. Dwi Astuti Aprijani, M.Kom. lahir di Probolinggo. Pendidikan Strata 1 Matematika dan S2 Ilmu Komputer diperoleh dari Universitas Indonesia. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Aljabar Linear Elementer dan Sistem Informasi Manajemen. Bidang minat penelitian adalah Information Retrieval. Email yang dapat dihubungi adalah **dwias@ecampus.ut.ac.id**

Dr. Fatia Fatimah, S.Si., M.Pd., lahir di Pinagar, Sumatera Barat tahun 1980. Fatia, panggilan akrabnya, lulus S-1 jurusan Matematika Universitas Andalas tahun 200, menyelesaikan S-2 Teknologi Pendidikan Konsentrasi Matematika Universitas Negeri Padang dengan predikat *Cumlaude* tahun 2009. Pada tahun 2018 Fatia juga berhasil mendapat *Cumlaude* Program Doktor Matematika Universitas Gadjah Mada. Penulis adalah dosen Matematika, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Terbuka sejak 2009. Penulis merupakan penemu teori *N-Soft Sets*. Bidang penelitian adalah pengambilan keputusan *uncertainty*. Semua karya penulis dapat dibaca pada fatia.staff.ut.ac.id. Penulis juga sebagai *invited speaker* di berbagai kegiatan. Gelar non akademik yang diperoleh *Certified International Research Reviewer* (CIRR), *Certified Digital Speaker* (CDS), *Certified Speakerpreneur* (CSP), *Certified Professional Motivator* (CPM), *Certified International Quantitative Researcher* (CIQnR), dan *Certified International Qualitative Researcher* (CIQaR). Email yang dapat dihubungi adalah **fatia@ecampus.ut.ac.id**

Darsih Idayani, M.Si. lahir di Situbondo, Jawa Timur. Pendidikan S1 Matematika diperoleh dari ITS pada tahun 2010. Pendidikan S2 juga diperoleh dari ITS pada tahun 2014. Saat ini bertugas sebagai dosen pada Program Studi Matematika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Terbuka. Mata kuliah yang diampu adalah mata kuliah Kalkulus I, Pemodelan Matematis, Metode Matematis I, dan Metode Matemais II. Bidang minat penelitian adalah matematika terapan (riset operasi). Email yang dapat dihubungi adalah **darsih@ecampus.ut.ac.id**

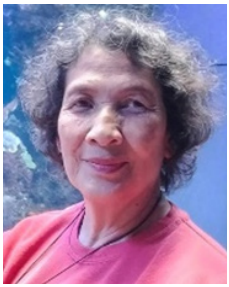
Siti Umamah Naili Muna, S.Si., M.Si. lahir di Cimanggis Bogor. Pendidikan S1 Matematika diperoleh dari Institut Pertanian Bogor pada tahun 2017. Pendidikan S2 Matematika Terapan diperoleh dari Institut Pertanian Bogor pada tahun 2019. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Matematika Aktuaria, Matematika Finansial, Kalkulus 1, dan Kalkulus 2. Bidang minat penelitian adalah di bidang aktuaria. Email yang dapat dihubungi adalah **naili@ecampus.ut.ac.id**

Selly Anastassia Amellia Kharis, S.Pd, M.Si. lahir di Jakarta. Pendidikan Strata 1 Pendidikan Matematika diperoleh dari Universitas Negeri Jakarta pada tahun 2016. Pendidikan S2 diperoleh dari Universitas Indonesia pada tahun 2018. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Fungsi Kompleks, Kalkulus I, Kalkulus II, dan Pengantar Matematika. Bidang minat penelitian adalah Analisis Data. Email yang dapat dihubungi adalah **selly@ecampus.ut.ac.id**

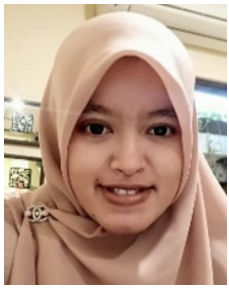
Elin Herlinawati, S.Pd., M.Si. lahir di Serang, Banten, tahun 1990. Pendidikan Strata 1 di bidang Pendidikan Matematika diperoleh dari Universitas Sultan Ageng Tirtayasa pada tahun 2011. Pendidikan S2 diperoleh dari Program Studi Magister Matematika FMIPA Institut Teknologi Bandung pada tahun 2017. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Analisis I, Analisis II, dan Geometri. Bidang minat penelitian adalah dibidang Matematika Analisis. Email yang dapat dihubungi adalah **elin@ecampus.ut.ac.id**

Wahyu Hidayat, M.Si. lahir di Cirebon. Pendidikan Strata 1 Matematika diperoleh dari Universitas Pendidikan Indonesia pada tahun 2008. Pendidikan S2 diperoleh dari Institut Teknologi Bandung pada tahun 2014. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Pengantar Teori Grup dan mata kuliah Pengantar Teori Ring. Bidang minat penelitian adalah di bidang Aljabar. Email yang dapat dihubungi adalah **wahyuhidayat@ecampus.ut.ac.id**

Deddy Ahmad Suhardi, S.Si., M.M. lahir di Cianjur. Pendidikan Strata 1 bidang Statistika diperoleh dari Institut Pertanian Bogor pada tahun 1996. Pendidikan S2 bidang manajemen keuangan diperoleh dari Universitas Persada Indonesia YAI pada tahun 2007. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Analisis Data Stataistik, Metode Sekuensial, dan Statistika Pengawasan Kualitas. Bidang minat penelitian adalah analisis sekuesial, statistik pengendalian kualitas, manajemen brand, dan manajemen sistem pendidikan jarak jauh. Email yang dapat dihubungi adalah **deddyas@ecampus.ut.ac.id**



Ir. Sri Yuniati Putri Koes Hardini, M.P. lahir di Banjarnegara. Pendidikan Strata 1 Peternakan diperoleh dari IPB University pada tahun 1982. Pendidikan S2 diperoleh dari IPB University pada tahun 2008. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Lingkungan Ternak dan mata kuliah Pengolahan Limbah Ternak. Bidang minat penelitian adalah di bidang Agribisnis. Email yang dapat dihubungi adalah **yuniati@ecampus.ut.ac.id**



Heny Kurniawati, S.ST., M.Kes., lahir di Klaten tahun 1987. Pendidikan Diploma IV Bidan Pendidik diperoleh dari Universitas Sebelas Maret (UNS) Surakarta pada tahun 2009. Pendidikan S2 diperoleh dari Universitas yang sama pada program studi kedokteran keluarga peminatan pendidikan profesi kesehatan pada tahun 2015. Saat ini mengampu mata kuliah Biologi Umum, Parasitologi, dan Embriologi Hewan di Program Studi Biologi Universitas Terbuka. Alamat email yang dapat dihubungi adalah **henyk@ecampus.ut.ac.id**

Mutimanda Dwisatyadini, M.Kep. lahir di Jakarta. Pendidikan S1 bidang Keperawatan diperoleh dari Universitas Binawan pada tahun 2009. Pendidikan S2 bidang Keperawatan diperoleh dari Universitas Indonesia pada tahun 2012. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Mikrobiologi, dan mata kuliah Hidrobiologi. Bidang minat penelitian adalah di bidang Kesehatan dan Biomedik. Email yang dapat dihubungi adalah **mutimanda@ecampus.ut.ac.id.**

Sri Utami, S.ST., M.Kes., lahir di Banyuwangi tahun 1987. Pendidikan Diploma IV Bidan Pendidik diperoleh dari Universitas Kadiri di Kediri pada tahun 2010. Gelar Magister Kesehatan, peminatan kesehatan ibu anak dan kesehatan reproduksi diperoleh dari Universitas Udayana pada tahun 2015. Tahun 2014-2015 menjadi trainee pada program beasiswa Field Research Training Program (FRTP), kolaborasi The Kirby Institute, UNSW Australia dengan Universitas Udayana. Saat ini bertugas sebagai staf pengajar di Program Studi Biologi Universitas Terbuka, dengan mata kuliah yang diampu adalah Fisiologi Hewan, Embriologi Hewan, dan Ekologi Manusia. Alamat email yang dapat dihubungi adalah **sri-utami@ecampus.ut.ac.id**

Fawzi Rahmadiyan Zuhairi, S.Si., M.Sc. lahir di Temanggung pada tahun 1989. Pendidikan Strata 1 Biologi diperoleh dari Institut Teknologi Bandung pada tahun 2012. Pendidikan S2 bidang *Molecular Biosciences* diperoleh dari University of Oslo tahun 2017. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah Biologi Sel. Bidang minat penelitian adalah di Biologi Sel dan Molekuler. email: **fawzi.zuhairi@ecampus.ut.ac.id**

Siti Hadijah Hasanah, S.Si., M.Si., lahir di Jakarta. Pendidikan Strata 1 bidang Matematika diperoleh dari UIN Syarif Hidayatullah Jakarta pada tahun 2009. Pendidikan S2 diperoleh dari Institut Pertanian Bogor pada tahun 2015 bidang Statistika. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Komputer, Matematika, dan Demografi. Bidang minat penelitian adalah di bidang Statistika dan Komputasi. Email yang dapat dihubungi adalah **sitihadijah@ecampus.ut.ac.id.**

Adhi Susilo, SPt., M.Biotech.St., Ph.D., lahir di Purwokerto-Jawa Tengah. Pendidikan Strata 1 diperoleh dari Fakultas Peternakan Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, Jawa Tengah, pada tahun 1994. Pendidikan S2 diperoleh dari College of Medicine and Public Health, Flinder Adelaide University, South Australia pada tahun 2007, dan dilanjutkan pendidikan Doktor pada bidang kurikulum di Universitas Simon Fraser Vancouver British Columbia-Canada, lulus pada tahun 2013. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Kewirausahaan Produk Pangan, Bioteknologi Pangan, Manajemen Industri Pangan dan dan Penanganan dan Pengolahan Hasil Ternak. Bidang minat penelitian adalah di bidang produk pangan dan pendidikan jarak jauh. Email yang dapat dihubungi adalah **adhi@ecampus.ut.ac.id**

Sigit Supriyadi, S.Si., M.Si., lahir di Yogyakarta. Pendidikan Strata 1 bidang Matematika diperoleh dari Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta pada tahun 1994. Pendidikan S2 diperoleh dari Universitas Indonesia pada tahun 2013 di bidang Matematika. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Matematika, Asuransi, dan Pengantar Probabilitas. Bidang minat penelitian adalah di bidang Matematika, Asuransi, dan Statistika. Email yang dapat dihubungi adalah **sigit_supriyadi@ecampus.ut.ac.id**

Dini Nur Hakiki, S.T.P, M.Si. lahir di Pasuruan. Pendidikan S1 bidang Teknologi Industri Pertanian diperoleh dari Institut Pertanian Bogor (IPB) pada tahun 2006. Pendidikan S2 Teknologi Pascapanen diperoleh dari IPB pada tahun 2015. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah Penanganan dan Pengolahan Hasil Hortikultura, Penanganan dan Pengolahan Serealia dan Palawija, serta Penanganan dan Pengolahan

Hasil Peternakan. Bidang minat penelitian adalah di bidang Teknologi Pascapanen, Rekayasa Pangan, Pangan Lokal, Pangan Fungsional, dan Pangan Halal. Email yang dapat dihubungi adalah **dini-hakiki@ecampus.ut.ac.id**

Athiefah Fauziyyah, S.T.P., M.Si. lahir di Yogyakarta pada tanggal 14 Juli 1991. Pada tahun 2013, penulis meraih sarjana pada bidang teknologi pangan dari Universitas Gadjah Mada. Pendidikan S2 diperoleh dari Institut Pertanian Bogor di bidang ilmu pangan. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah Teknologi Pengolahan Pangan, Regulasi Pangan, Evaluasi Sensori, Penyimpanan dan Penggudangan, Kewirausahaan Produk Pangan dan Praktikum Teknologi Pengolahan Pangan. Bidang minat penelitian penulis adalah bidang teknologi pangan. Penulis dapat dihubungi pada alamat email **athiefah.fauziyyah@ecampus.ut.ac.id**

Dra. Eko Yuliastuti E.S., M.Si. lahir di Kudus. Pendidikan S1 di bidang Biologi diperoleh dari Universitas Jenderal Soedirman pada tahun 1988. Pendidikan S2 di bidang Gizi Masyarakat diperoleh dari IPB pada tahun 2005. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Evaluasi Nilai Gizi Pangan, Pengetahuan Bahan Pangan, dan Penanganan dan Pengolahan Hasil Perikanan. Bidang minat penelitian adalah di bidang gizi pangan. Email yang dapat dihubungi **eko@ecampus.ut.ac.id**

Mutiara Ulfah, S.T.P., M.Sc. lahir di Tangerang. Pendidikan Strata 1 bidang Teknologi Pangan dan Hasil Pertanian diperoleh dari Universitas Gadjah Mada pada tahun 2013. Pendidikan S2 diperoleh dari Universitas Gadjah Mada pada tahun 2018. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah Pengetahuan Bahan Pangan, Regulasi Pangan, Bioteknologi Pangan, dan Praktikum Evaluasi Sensori. Bidang minat penelitian adalah di bidang rekayasa, kimia pangan, pangan lokal dan tradisional. Email yang dapat dihubungi adalah **mutiaraulfah@ecampus.ut.ac.id**

Rina Rismaya, S.T.P, M.Si. lahir di Kuningan, 30 Juni 1993. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 di Departemen Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor (*IPB University*) pada tahun 2016, kemudian menyelesaikan pendidikan S2 di program magister Ilmu Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, *IPB University* pada tahun 2017. Saat ini penulis merupakan dosen di Prodi Teknologi Pangan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka. Selama menjadi dosen, penulis mengampu beberapa mata kuliah diantaranya adalah satuan operasi industri pangan, prinsip teknik pangan, praktikum Prinsip Teknik Pangan, Ekonomi Pangan, Ekonomi Teknik dan mata kuliah lain pada rumpun bidang rekayasa proses pangan dan ilmu pangan terapan. Penulis memiliki bidang minat penelitian pada rekayasa proses pangan. Email penulis yang dapat dihubungi adalah **rinarismaya@ecampus.ut.ac.id.**

ing. Mohamad Rajih Radiansyah B.AS., M.Sc., berasal dari kota Jakarta. Pendidikan S1 bidang *Process and Food Technology* diperoleh dari *The Hague University of Applied Sciences* pada tahun 2011 dan Pendidikan S2 bidang *Food Technology* diperoleh dari *Gent University* pada tahun 2018. Mata kuliah yang menjadi ampuan diantaranya adalah Pengemasan Pangan, Pengendalian Mutu pada Industri Pangan, Rancangan Percobaan untuk Teknologi Pangan dan Rekayasa Pangan. Minat dan penelitian adalah dalam bidang nutrisi, teknologi dan rekayasa pangan. Email yang dapat dihubungi adalah **ing-mohamad@ecampus.ut.ac.id**

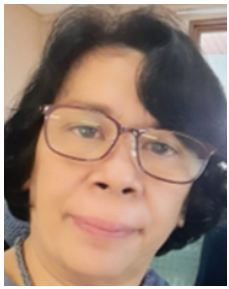
Iffana Dani Maulida, S.Si., M.Sc. lahir di Kab Demak. Gelar Strata 1 bidang Kimia diperoleh di Universitas Diponegoro lulus pada tahun 2010. Pendidikan S2 bidang yang sama diselesaikan di Universitas Gadjah Mada tahun 2014. Mata kuliah yang diampu antara lain Kimia Dasar, Kimia Analitik, Kimia Fisik, khususnya bidang keahlian Kimia Organik, yang meliputi Bahan Alam, Obat dan Pangan. Email yang dapat dihubungi adalah **iffana@ecampus.ut.ac.id**

Rozana, S.TP., M.Si. lahir di Kabupaten Sambas, Kalimantan Barat. Pendidikan Sarjana bidang Teknologi Industri Pertanian diperoleh dari Universitas Tribhuwana Tunggadewi Malang pada tahun 2011. Pendidikan Magister bidang Teknologi Pascapanen diperoleh dari Institut Pertanian Bogor pada tahun 2016. Pada tahun 2017 - 2019 berkesempatan menjadi salah satu pengajar di Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Universitas Tribhuwana Tunggadewi Malang, dan pada tahun 2019-sekarang aktif sebagai pengajar di Program Studi Agroindustri Pangan, Politeknik

Negeri Sambas. Salah satu Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah Fisiologi dan Teknologi Pascapanen. Publikasi yang telah dihasilkan antara lain pada Teknik Pengeringan Manisan Mangga, Perlakuan *Hot Water Treatment* pada Pascapanen Buah Kesemek, Simulasi Transportasi buah Tomat, dan *Minimally Process* pada buah Rambutan. Bidang minat penelitian adalah di bidang Teknologi Pascapanen dan Rekayasa Proses Pangan. Email yang dapat dihubungi adalah **rozana@poltesa.ac.id**

Ariyanti Hartari, S.T.P., M.Si. lahir di Malang. Pendidikan Strata 1 bidang diperoleh dari Universitas Brawijaya pada tahun 2002. Pendidikan S2 diperoleh dari Institut Pertanian Bogor pada tahun 2005, dan saat ini sedang melanjutkan pendidikan Doktor di universitas yang sama, sejak tahun 2020. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Prinsip Teknik Pangan, Satuan Operasi Industri Pangan, Evaluasi Sensori dan mata kuliah Praktikum Evaluasi Sensori. Bidang minat penelitian adalah di bidang teknologi pengolahan pangan dan evaluasi sensori. Email yang dapat dihubungi adalah **ariyanti@ecampus.ut.ac.id**

Sazli Tutur Risyahadi, S.T.P., M.T., MSi., lahir di Bogor. Pendidikan Strata 1 diperoleh dari Institut Pertanian Bogor, Jawa Barat. pada tahun 2009 di prodi Teknologi Industri Pertanian. Pendidikan S2 diperoleh dari Insitut Teknologi Bandung pada Prodi Teknik dan Manajemen Industri tahun 2012, dan dilanjutkan pendidikan Magister di Institut Pertanian Bogor pada Prodi Teknologi Pascapanen pada tahun 2015. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Kewirausahaan Produk Pangan dan Dasar-dasar Manajemen untuk Industri Pangan Bidang minat penelitian adalah teknik industri pangan dan pakan. Email yang dapat dihubungi adalah **sazlitutur@apps.ipb.ac.id.**



Dr. Ir. Nurmala Pangaribuan, MS. lahir di Medan. Pendidikan Strata 1 bidang Pertanian diperoleh dari Universitas Sumatera Utara (USU) pada tahun 1985. Pendidikan S2 diperoleh dari Institut Pertanian Bogor (IPB) pada tahun 1991, dan dilanjutkan pendidikan Doktor di Universitas Padjadjaran Bandung, lulus pada tahun 2017. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Budidaya Tanaman Perkebunan Utama, Budidaya Tanaman Pangan Utama, Pemanfaatan Limbah Pertanian, Pengantar Ilmu Pertanian dan mata kuliah Konservasi Sumber Daya Pertanian. Bidang minat penelitian adalah bidang Budidaya Tanaman dan Soil fertility. Email **nurmala@ecampus.ut.ac.id**

Sri Maulidia Permatasari, S.Si., M.Si. dilahirkan di Bukittinggi, 09 September 1992. Menamatkan pendidikan dasar hingga menengah atas di Kota Bukittinggi Sumatera Barat. Meraih gelar Sarjana tahun 2014 pada jurusan Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas Padang. Menyelesaikan pendidikan Magister di Institut Pertanian Bogor (IPB University) pada Jurusan Statistika Terapan. Saat ini, Penulis Mengajar di Universitas Terbuka pada Program Studi Statistika. Email: **srimaulidia@ecampus.ut.ac.id**

Dr. Sri Listyarini, M.Ed. lahir di Jakarta. Pendidikan Strata 1 pada bidang Kimia Murni diperoleh dari Universitas Indonesia (UI) pada tahun 1985. Pendidikan S2 pada bidang *Management of Distance Education* diperoleh dari *Simon Fraser University* (SFU) di Vancouver, Canada pada tahun 1990, dan dilanjutkan pendidikan Doktor pada bidang Pengelolaan Sumber Daya Alam

dan Lingkungan di Institut Pertanian Bogor (IPB), lulus pada tahun 2008. Mata kuliah yang menjadi ampuan pada program studi Magister Studi Lingkungan - Universitas Terbuka adalah mata kuliah Pemodelan Lingkungan dan mata kuliah Analisis Risiko dan Keberlanjutan Lingkungan. Bidang minat penelitian adalah di bidang Lingkungan. Email yang dapat dihubungi adalah **listyarini@ecampus.ut.ac.id**

Guruh Sri Pamungkas, S.Pt., M.Si. lahir di Wonogiri. Pendidikan Strata 1 bidang Peternakan diperoleh dari Universitas Sebelas Maret Surakarta pada tahun 2008. Pendidikan S2 diperoleh dari Universitas Sebelas Maret Surakarta pada tahun 2012. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Mikrobiologi di Politeknik Santo Paulus Surakarta. Bidang minat penelitian adalah di bidang mikrobiologi terapan. Email yang dapat dihubungi adalah **guruhsp77@gmail.com**

Mirza Permana, S.T., M.Si lahir di Karangasem – Bali pada tanggal 30 Mei 1987 sebagai anak kedua dari empat bersaudara. Mirza, panggilan akrabnya menamatkan pendidikan S1 pada Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang melalui jalur Undangan dan lulus pada tahun 2010 sebagai Sarjana Teknik (ST). Pengalaman bekerja penulis dimulai pada tahun 2011 dengan mengerjakan beberapa proyek penataan ruang di wilayah Provinsi Maluku. Tahun 2017 mendapatkan kesempatan untuk melanjutkan jenjang S2 pada Program Studi Ilmu Perencanaan Wilayah di Institut Pertanian Bogor dan lulus pada tahun 2019. Hampir 1 dekade sudah Mirza bekerja sebagai praktisi di dunia perencanaan wilayah dan kota hingga akhirnya memutuskan untuk menjadi akademisi pada akhir tahun 2021. Capain terbesar selama berkarier di dunia praktisi adalah sebagai juara 1 sayembara penataan kampung kumuh Manggarai yang diselenggarakan oleh Ikatan Ahli Perencanaan DKI Jakarta pada

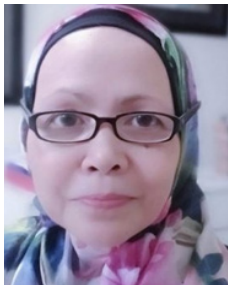
tahun 2021. Saat ini penulis merupakan dosen Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Jurusan Teknik, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Terbuka. Semua karya penulis dapat dibaca pada laman: https://scholar.google.com/citations?user=3lqTd4cAAAAJ&hl=id. Dalam menjalani kehidupan, penulis selalu berpegang teguh pada motto: *kesuksesan lahir dari kejujuran.* Email yang dapat dihubungi adalah **permanamirza@ecampus.ut.ac.id.**

Guntur Bagus Pamungkas, S.T., M.P.W.K. lahir di Semarang. Pendidikan Strata 1 Teknik Geodesi diperoleh dari Universitas Diponegoro pada tahun 2014. Pendidikan S2 Magister Perencanaan Wilayah dan Kota diperoleh dari Universitas Diponegoro pada tahun 2021. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Sistem Informasi Perencanaan dan mata kuliah Analisis SDA Lingkungan. Bidang minat penelitian adalah di bidang Geospasial untuk perkotaan dan kewilayahan. Email yang dapat dihubungi adalah **gunturbagusp@ecampus.ut.ac.id**

Erika Pradana Putri, ST., M.Sc. lahir di Bogor. Pendidikan S1 bidang Perencanaan Wilayah dan Kota diperoleh dari Universitas Gadjah Mada, pada tahun 2008. Pendidikan S2 diperoleh dari Asian of Institute of Technology, Thailand pada tahun 2011. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Pengantar Perencanaan Wilayah dan Kota, Pengantar Proses Perencanaan, Hukum dan Administrasi Perencanaan, dan Studio Proses Perencanaan. Bidang minat penelitian adalah di transportasi dan perkotaan. Email yang dapat dihubungi adalah **erikap@ecampus.ut.ac.id**

Ulul Hidayah, ST., M.Si. lahir di Jombang. Pendidikan S1 bidang Perencanaan Wilayah dan Kota diperoleh dari Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya pada tahun 2016. Pendidikan S2 diperoleh dari Institut Pertanian Bogor di Program Studi Ilmu Perencanaan Pembangunan Wilayah dan Perdesaan pada tahun 2017. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah Ekonomi Wilayah dan Kota, Ekonomi Lingkungan, Perencanaan Wilayah, dan Studio Perencanaan Wilayah. Email yang dapat dihubungi adalah **ulul-hidayah@ecampus.ut.ac.id**

Dr. Abdillah Munawir, S.P., M.Si, CIRR dilahirkan di Raha, 03 Januari 1985. Menamatkan pendidikan dasar hingga menengah atas di Kabupaten Konawe. Meraih gelar Sarjana pada tahun 2010 pada jurusan Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Haluoleo Kendari. Menyelesaikan pendidikan Magister di Universitas yang sama dan Doktoral di Institut Pertanian Bogor (IPB University) pada bidang Keahlian Pengelolaan Lingkungan, Fluks Energi, Evapotranspirasi dan Pemodelan Pengelolaan Lingkungan dan Sumberdaya Alam. Saat ini, Penulis Mengajar di Magister Studi Lingkungan, Pusat Pengelolaan dan Penyelanggaraan Program Pascasarjana (P4s) Universitas Terbuka Pondok Cabe Tanggerang Selatan. Beberapa hasil karya ilmiah Scopus Internasional Confrence antara lain; 'SEBAL Model to Estimate Biophysics and Energy Flux Variable: Availability of Evapotranspiration Distribution Using Remote Sensing in Lore Lindu National Park' dan 'Dynamics factors that affect the land use change in the Lore Lindu National Park, Indonesia'. Penulis juga merupakan salah seorang trainer Aplikasi Software Penelitian dan Penunjang Keputusan, khususnya pada bidang Analisis Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan. **Email : abdillahmunawir@ecampus.ut.ac.id**



Prof.Dr.Ir.TaniaJune,M.Sc,lahirdiMeulaboh pada tanggal 28 Juni 1963. Pendidikan S1 diperoleh di Agrometeorologi IPB University, S2 di Agricultural Science University of Queensland, Australia dan S3 di Plant Sciences/Environmental Biology Australian National University, Australia. Saat ini beliau menajdi Guru Besar IPB University di Bidang Pakar Pemodelan Penyerapan CO2 oleh Kanopi Tanaman, Proses dan Pengukuran Fluks Energi dan Massa, Mikrometeorologi. Departemen Geofisika dan Meteorologi, FMIPA, Kampus Darmaga, IPB University. Email yang dapat dihubungi adalah **taniajune@apps.ipb.ac.id**

Prof. Dr. Ir. Cecep Kusmana, MS lahir di Sumedang, 12 Februari 1961. Pendidikan S1 diperoleh di Manajemen Hutan IPB University, kemudian melajutnka S2 diProgram Studi Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan IPB University, dan S3 di Forest Ecology Kyoto University, Japan. Saat ini beliau merupakan dosen Divisi Ekologi Hutan, Departemen Silvikultur, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, IPB University. Email yang dapat dihubungi adalah **ckmangrove@gmail.com**

Dr. Yudi Setiawan, S.P., M.Env.Sc. Lahir di Bandung pada tanggal 30 Juli 1978. Pendidikan S1 diperoleh dari Departemen Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian Institut Pertanian Bogor, S2 Environmental Sciences University of Tsukuba, Japan, dan terakhir Pendidikan S3 Sustainable Environmental Studies University of Tsukuba, Japan. Saat ini bekerja di Kehutanan dan Lingkungan, IPB University serta Center for Environmental Research, IPB University. Email yang dapat dihubungi adalah **setiawan.yudi@apps.ipb.ac.id.**

Anindya Putri Tamara, S.T., M.P.W.K. lahir di Jakarta Selatan. Pendidikan Strata 1 bidang Teknik Perencanaan Wilayah dan Kota diperoleh dari Universitas Diponegoro pada tahun 2013. Pendidikan S2 diperoleh dari Universitas Diponegoro pada tahun 2019. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Teknik Komunikasi dan Presentasi, Manajemen Pembangunan, Perencanaan Infrastruktur Berkelanjutan, Sistem Sosial, Sarana dan Prasarana dan Pengembangan Lahan. Bidang minat penelitian adalah di bidang perencanaan perkotaan maupun pengembangan wilayah. Email yang dapat dihubungi adalah **anindya@usm.ac.id**

Galih Hendro Wijayanto. lahir di Sleman. Pendidikan Sekolah Menengah Atas di tempuh di SMAN 1 MOJOTENGAH, dan lulus pada tahun 2020. Saat ini merupakan mahasiswa Prodi perencanaan wilayah kota Univetrsitas Terbuka Mata kuliah yang diminati adalah mata kuliah Tata Guna Pengembangan Lahan dan mata kuliah Pengantar Ilmu Lingkungan. Bidang minat penelitian adalah di bidang Pengelolaan lahan deforestasi. Email yang dapat dihubungi adalah **044086317@ecampus.ut.ac.id**

Dr. Sodikin, S.Pd, M.Si, M.P.W.K. lahir di Indramayu, 22 Februari 1987. Pendidikan Strata 1 diperoleh dari Prodi Pendidikan Geografi Universitas Pendidikan Indonesia pada tahun 2010. Pendidikan S2 diperoleh dari Program Magister Ilmu Lingkungan Universitas Diponegoro lulus pada tahun 2013, dan dilanjutkan pendidikan Doktor pada Prodi Ilmu Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan Institut Pertanian Bogor (IPB), lulus pada tahun 2018. Pada

Tahun 2020 melanjutkan Kembali pada Program Magister Perencanaan Wilayah dan Kota Universitas Pakuan Bogor dan lulus pada tahun 2022. Saat ini penulis menjadi dosen di Prodi Magister Studi Lingkungan Program Pascasarjana Universitas Terbuka. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah Permodelan lingkungan, Valuasi Lingkungan, Sistem Manajemen Lingkungan, serta Analisis Risiko dan Keberlanjutan lingkungan. Bidang minat penelitian adalah di bidang *Remote Sensing* dan Geographic Information System (GIS) khususnya untuk kajian lingkungan. Email yang dapat dihubungi adalah **sodikinn@ecampus.ut.ac.id.**

Kusuma Lelana Ari Lestari, S.Si Lahir di Klaten, 03 Oktober 1987. Pendidikan Strata 1 Jurusan Biologi Lingkungan, Fakultas Teknobiologi, Universitas Atma Jaya Yogyakarta tahun 2009. Saat ini sedang menempuh pendidikan Magister Studi Lingkungan pada Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Terbuka. Email yang dapat dihubungi **kusumalelana87@gmail.com**

Fauzi Fahmi. lahir di Jakarta. Penulis menempuh pendidikan dasar di SD Negeri 15 Grogol Utara; menengah pertama di SMP Negeri 66 Jakarta; dan menengah atas di SMA Negeri 32 Jakarta. Setelah lulus ditahun 2018 penulis lolos jalur UMPTKIN dan diterima di Program Studi Tadris Ilmu Pengetahuan Sosial, Fakultas Ilmu Tarbiyah dan Keguruan, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta. Di Program Studi Ilmu Pengetahuan Sosial, penulis mengambil konsentrasi geografi. Bidang minat penelitian adalah di bidang penginderaan jauh dan SIG. Saat penulis bekerja sebagai trainer dan kosultan GIS di PT Geo Alam Teknika Indonesia. Email yang dapat dihubungi adalah **fahmi.fauzi18@uinjkt.ac.id**

Dr. Lina Warlina, M.Ed. lahir di Padang Panjang. Pendidikan Strata 1 bidang FMIPA Kimia diperoleh dari Universitas Indonesia pada tahun 1985. Pendidikan S2 diperoleh dari Simon Fraser University, Canada pada tahun 1990, dan dilanjutkan pendidikan Doktor di Institut Pertanian Bogor, lulus pada tahun 2008. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Kelembagaan Lingkungan dan mata kuliah Analisis Kebijakan Lingkungan. Bidang minat penelitian adalah di bidang lingkungan. Email yang dapat dihubungi adalah **warlina@ecampus.ut.ac.id**

Dr. Agus Susanto, M.Si adalah Dosen Program Studi (S1) Perencanaan Wilayah dan Kota, Pasca Sarjana (S2) Studi Lingkungan Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka, yang lahir di Pati, 27 Juni 1957. Menempuh pendidikan S1 di Jurusan Hidrologi, Fakultas Geografi UGM, S2 (M.Si) di Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan IPB, dan S3 (Dr) di Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan IPB. Selain mengajar pada Perencanaan Wilayah dan Kota S1 dan Pascasarjana di UT, juga merupakan praktisi dibidang Hidrologi, Perencaaan Wilayah Perdesaan, dan Lingkungan. selain itu, terlibat aktif dalam pertemuan-pertemuan ilmiah baik dalam negeri maupun luar negeri, dan sebagai reviewer beberapa Jurnal antara lain: Reksa Bumi, Jurnal Matematika Sain dan Teknologi.

Drs. Sumartono, M.Si., lahir di Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Pendidikan S1 Jurusan Geografi Kependudukan dan Demografi diperoleh dari Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada pada tahun 1983. Pendidikan S2 Sosiologi Pedesaan diperoleh dari Fakultas Ekologi Manusia, Institut Pertanian Bogor, pada tahun 2013. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Kependudukan, mata kuliah Dasar-

dasar Geografi dan mata kuliah Sistem Sosial. Bidang minat penelitian adalah bidang ilmu sosial dan kependudukan. Email yang dapat dihubungi adalah **sumartono@ecampus.ut.ac.id.**

Dr. A. Hadian Pratama Hamzah.,S.IP.,M.I.L. lahir di Panglkalan Susu 26 Februari 1989. Pendidikan Strata 1 bidang Adminitrsi Pubilik diperoleh dari Universitas Padjadjaran pada tahun 2011. Pendidikan S2 diperoleh dari Universitas Padjadjaran pada Bidang Pembangunan dan Konservasi Lingkungan Pedesaan pada tahun 2013, dan dilanjutkan pendidikan Doktor di Universitas Diponegoro, lulus pada tahun 2021. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Permodelan Lingkungan, Valuasi Lingkungan, Psikologi Lingkungan dan Sistem Manajamen Lingkungan. Bidang minat penelitian adalah di bidang Konservasi Mangrove, Kearifan Lokal Lingkungan, Kebijakan Lingkungan. Email yang dapat dihubungi adalah **hadian@ecampus.ut.ac.id**

Dr. Ir. Nurhasanah, M.Si, lahir di Jakarta pada tanggal 11 Nopember 1963. Pendidikan Strata 1 bidang Ilmu Tanah diperoleh dari IPB pada tahun 1986, S2 bidang Ilmu Tanah diperoleh dari IPB pada tahun 2000, dan S3 bidang Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan diperoleh dari IPB pada tahun 2012. Mata kuliah yang diampu adalah Ekologi, Ekoefisiensi Lingkungan, Metodologi Penelitian di Era Digital, Dasar-Dasar Ilmu Tanah, dan Pengantar Ilmu Pertanian. Email yang dapat dihubungi adalah **nenganah@ecampus.ut.ac.id.**

Sohifah.,S.T.,M.I.L , Sohifah, S. Pd, M. I. L. lahir di Banten pada tanggal 28 Oktober 1984. Pendidikan Strata 1 bidang pendidikan diperoleh dari Universitas Pendidikan Indonesia pada tahun 2007, S2 bidang Ilmu Lingkungan diperoleh dari Unpad pada tahun 2013, keseharian sbg tenaga teknis pada Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Jawa Barat, 2015- 2018 di bidang konservasi lingkungan dan keanekaragaman hayati 2019-sekarang di sekretariat. Email yang dapat dihubungi **sohifah@gmail.com**

Farisa Maulinam Amo, ST., MT. lahir di Manado. Pendidikan Strata 1 bidang Perencanan Wilayah dan Kota diperoleh dari Universitas Sam Ratulangi pada tahun 2013. Pendidikan S2 diperoleh dari Institut Teknologi Bandung pada tahun 2017. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Perencanaan Transportasi, Teknik Komunikasi dan Presentasi, dan mata kuliah Karya Ilmiah. Bidang minat penelitian adalah di bidang Transportasi, dan Infrastruktur Wilayah, serta Mitigasi Bencana. Email yang dapat dihubungi adalah **farisa@ecampus.ut.ac.id**

Dr. Jalil, S.Pi., M.P. lahir di Luwu. Pendidikan Strata 1 bidang Manajemen Sumberdaya Perikanan, diperoleh dari Universitas "45" Ujungpandang, pada tahun 1996. Pendidikan S2 diperoleh dari Universitas Hasanuddin pada tahun 2001, dan dilanjutkan pendidikan Doktor di universitas yang sama, lulus pada tahun 2021. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Ekonomi Pembangunan Perikanan, Manajemen Sumberdaya Perikanan, dan mata kuliah Legalitas Hukum Kelautan dan Perikanan. Bidang minat penelitian adalah di bidang Manajemen Sumberdaya Perikanan. Email yang dapat dihubungi adalah **jalil@ecampus.ut.ac.id**

Prof. Achmar Mallawa adalah guru besar tetap pada Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan Universitas Hasanuddin, Makassar, Sulawesi Selatan. Penulis dilahirkan di Palopo, Kabupaten Luwu pada 21 Desember 1951. Menyelesaikan pendidikan sarjana (S-1) di Universitas Hasanuddin afiliasi Institut Pertanian Bogor pada tahun 1978; magister sains (S-2) bidang oseanologi di Universite Sains dan Teknologi Languedoc, Montpellier, Prancis pada tahun 1984, dan pendidikan doktor (S-3) bidang oseanologi di Universite de Perpignan Prancis pada tahun 1986. Selain sebagi staf pengajar dan peneliti pada program sarjana dan Pascasarjana Unhas, juga aktif pada berbagai pertemuan ilmiah pada tingkat nasional dan internasional. Beberapa tulisannya telah dimuat pada jurnal nasional terakreditasi dan jurnal internasional. Sekarang ini penulis aktif mengajar dan membimbing, baik program sarjana maupun pascasarjana di Universitas Hasanuddin, menjadi peneliti, dan narasumber pada berbagai kegiatan di bidang perikanan, khususnya bidang perikanan tangkap. Email yang dapat dihubungi adalah **achmar_mallawa@yahoo.co.id.**

Dr. Ir Faisal Amir., M.Si. lahir di Luwu. Pendidikan Strata 1 dari Universitas Hasanuddin pada tahun 1988. Pendidikan S2 diperoleh dari Institut Pertanian Bogor pada tahun 1995, dan dilanjutkan pendidikan Doktor di Universitas Hasanuddin, lulus pada tahun 2010. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah mata kuliah Daerah Penangkapan Ikan, Manajemen Operasi Penangkapan Ikan Pembangunan Perikanan, Pengolahan Data Perikanan Tangkap, Dinamika Populasi dan Pendugaan Stock. Bidang minat penelitian adalah di bidang perikanan. Email yang dapat dihubungi adalah **faisalamir_unhas@yahoo.com.**

Safruddin, S,Pi, MP. Ph.D. lahir di Palopo. Pendidikan Strata 1 Oseanografi Perikanan dari Universitas Hasanuddin pada tahun 1998. Pendidikan S2 bidang oseangrafi perikanan diperoleh dari Universitas Hasanuddin pada tahun 2002, dan dilanjutkan pendidikan Doktor bidang Akustik dan Oseanografi di Universitas Hokaido University, lulus pada tahun 2013. Mata kuliah yang menjadi ampuan adalah Oseanografi Perikanan, Oseanografi Terapan, Penginderaan Jauh Perikanan Tangkap, Sistem Informasi Perikanan Tangkap, Daerah Penangkapan Ikan, Instrumen dan Teknologi Penangkapan Ikan dan Teknik Pemetaan Perikanan Tangkap. Email yang dapat dihubungi adalah **safruddinhasyim@gmail.com.**

Muhammad Givari Ramdhani lahir di sukabumi 22 Januari 1996. Lulus dari MAN 1 Kabupaten Sukabumi pada tahun 2014 dan melanjutkan Pendidikan strata satu di Universitas Terbuka Program Studi Matematika, Fakultas Sains dan Teknologi. Selama berkuliah memiliki minat penelitian di bidang data. Email yang dapat dihubungi adalah **givariramdhan22@gmail.com**

UNIVERSITAS TERBUKA

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI

Penerbit Universitas Terbuka
Jalan Cabe Raya, Pondok Cabe, Pamulang,
Tangerang Selatan - 15437, Banten - Indonesia
Telp. 021-7490941, Faks. 021-7490147
Website. www.ut.ac.id