



08/40189

PERPUSTAKAAN  
UNIVERSITAS TERBUKA

# MODEL KEBIJAKAN UNTUK PENGENDALIAN PENCEMARAN DEPOSISI ASAM DI PROVINSI DKI JAKARTA

SRI LISTYARINI



SEKOLAH PASCASARJANA  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
2008

**PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI  
DAN SUMBER INFORMASI**

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa segala pernyataan dalam disertasi saya yang berjudul **"MODEL KEBIJAKAN UNTUK PENGENDALIAN PENCEMARAN DEPOSISI ASAM DI PROVINSI DKI JAKARTA"** merupakan gagasan atau hasil penelitian disertasi saya sendiri, dengan arahan Komisi Pembimbing, kecuali yang dengan jelas ditunjukkan rujukannya. Disertasi ini belum pernah diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi lain. Semua sumber data dan informasi yang digunakan telah dinyatakan secara jelas dan dapat diperiksa kebenarannya.

Bogor, Mei 2008

Sri Listyarini

Nrp. P062034024/PSL

## ABSTRACT

SRI LISTYARINI. Policy Model for Controlling The Acid Deposition Pollution in The Jakarta Province. RUDY C. TARUMINGKENG as Chairman, AKHMAD FAUZI and PARULIAN HUTAGAOL as Members of the Advisory Committee.

The improvement in society's income will affect their life styles and increase their demand for energy. Fossil fuel being the main source of energy emits two type of pollutants, that is  $\text{SO}_x$  and  $\text{NO}_x$  gases which produce acid deposition.

The objective of this research is to assess the environmental degradation driven by acid deposition pollution in the Jakarta Province in order to develop the policy alternatives for controlling this pollution. The assessment was carried out by monetizing the effect of pollution using the goal programming and dynamic simulation models. The development of policy alternatives is accomplished by multi criteria decision analysis (MCDA) model.

The result from the goal programming model is the optimum quantity of fossil fuel which can be used as energy sources. From the dynamic simulation, it is estimated that started at 2008 until the end of simulation (2025) the Jakarta citizens will have to pay for their health problems, which are initiated by  $\text{SO}_x$  and  $\text{NO}_x$  gases. The outcome from MCDA model is the anticipation of the policy with environmental driven alternative is better than economic driven alternative as the development basis. The study recommends that reducing the  $\text{SO}_x$  and  $\text{NO}_x$  gases emission by combining the command and control (CAC) policies with the economic instrument policies. Additionally all stakeholders have to have the access to the academic policy development in order to improve their concerns and commitments.

Key words: acid deposition, command and control (CAC) policies, dynamic simulation, goal programming, multi criteria decision analysis (MCDA),  $\text{SO}_x$  and  $\text{NO}_x$  gases

## RINGKASAN

Peningkatan kualitas hidup ditandai dengan peningkatan kebutuhan energi. Di Indonesia, dan di DKI Jakarta khususnya, sebagian besar kebutuhan energi dipenuhi melalui pembakaran BBF (bahan bakar fosil). Selain menghasilkan energi pembakaran BBF mengemisikan berbagai polutan ke udara, antara lain berupa gas  $SO_x$  dan  $NO_x$  yang menyebabkan polusi deposisi asam.

Sebagai upaya menjaga kualitas udaranya pemerintah provinsi DKI Jakarta telah mengembangkan berbagai kebijakan. Namun kebijakan ini belum berfungsi secara maksimal, hal ini dibuktikan dengan data dan studi yang telah dilakukan terhadap kualitas udara di DKI Jakarta. Data dan studi mengenai konsentrasi ambien gas  $SO_x$  dan  $NO_x$  memperlihatkan kecenderungan peningkatan konsentrasi polutan tersebut. Sementara itu sebagian penduduk DKI Jakarta menggunakan BBF secara berlebihan atau boros.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kebijakan alternatif yang dirumuskan secara kuantitatif, agar dapat dijadikan model bagi para pengambil keputusan. Selanjutnya alternatif kebijakan yang dikembangkan dapat diterapkan untuk mengendalikan pencemaran deposisi asam, dan hasilnya diharapkan lebih baik dibandingkan dengan kebijakan yang telah ada. Guna mencapai tujuan umum tersebut, penelitian ini secara lebih spesifik bertujuan untuk:

1. Menganalisis jumlah optimal BBF yang dapat digunakan sebagai sumber energi bagi penduduk DKI Jakarta agar pencemaran deposisi asamnya minimal, untuk mengetahui tingkat pemborosan penggunaan BBF.
2. Mengestimasi nilai ekonomi dari kerusakan yang disebabkan oleh deposisi asam akibat penggunaan BBF sebagai sumber energi dan memprediksi nilai tersebut dimasa yang akan datang.
3. Memformulasikan alternatif-alternatif kebijakan untuk mengendalikan pencemaran deposisi asam.

Pengembangan model kebijakan pada penelitian ini diawali dengan perancangan model optimasi guna mengetahui jumlah optimum BBF yang dapat digunakan oleh penduduk DKI Jakarta sebagai sumber energi. Model optimasi dikembangkan dengan metode *goal programming* menggunakan perangkat lunak GAMS (Dellink, 2004; Thompson dan Thore, 1992). Langkah berikutnya adalah perancangan model simulasi sistem dinamik untuk menjawab pertanyaan seberapa besar nilai kerusakan yang ditimbulkan oleh polusi deposisi asam. Model simulasi sistem dinamik dikembangkan menggunakan *software* VENSIM (Pedercini, 2003). Berdasarkan kedua model yang dikembangkan (optimasi dan simulasi) dirancanglah berbagai alternatif kebijakan melalui metode multi kriteria analisis dengan bantuan perangkat lunak PRIME (Belton dan Stewart, 2002; Gustafsson *et al.*, 2001).

Penelitian ini mengambil Provinsi DKI Jakarta sebagai wilayah yang diteliti. Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah data mengenai kondisi sosial demografi DKI Jakarta yang diperoleh dari BPS (Badan Pusat Statistik). Data mengenai faktor iklim dan konsentrasi pencemar udara di Jakarta diperoleh dari BMG (Badan Meteorologi dan Geofisika), dan Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Daerah (BPLHD) di Jakarta.

Data jumlah dan jenis kendaraan didapatkan dari Badan Pembinaan Keamanan Direktorat Lalu Lintas, Kepolisian Negara Republik Indonesia (Ditlantas Polri). Data sekunder yang diperoleh adalah data tahun 1993 sampai dengan tahun 2004, namun demikian data tahun 1998 tidak disertakan dalam analisis, karena merupakan data pencilan akibat terjadinya krisis nasional pada saat itu. Selain menggunakan data tersebut, pengembangan model juga didasarkan atas rumus-rumus, faktor-faktor konversi, serta data dari berbagai hasil penelitian terdahulu.

Hasil yang diperoleh dari pengembangan model optimasi dengan metode *goal programming* menyatakan bahwa jumlah optimal BBF bagi penduduk DKI Jakarta adalah setara dengan produksi energi listrik sebesar 50,691 milyar kWh dengan nilai jual Rp. 25,090 Triliun. Jika nilai jual energi ini dibandingkan dengan PDRB pada tahun 2004 yang besarnya Rp.70,843 Triliun, maka diperoleh nilai penggunaan energi sebesar 35,416 persen dari PDRB. Besarnya perbandingan antara jumlah konsumsi energi terhadap PDRB merupakan gambaran pemborosan penggunaan energi di DKI Jakarta. Efisiensi penggunaan energi dapat dicapai melalui berbagai kebijakan, antara lain kebijakan peningkatan harga BBF, mengurangi subsidi BBM, memberikan subsidi bagi pengguna alat transportasi yang tidak menggunakan BBM, serta penghematan penggunaan energi nasional pada kegiatan transportasi, industri, dan rumah tangga.

Hasil pengembangan model simulasi sistem dinamik memperlihatkan bahwa peningkatan konsentrasi pencemar akan melampaui BMA, yang ditetapkan dalam Keputusan Gubernur DKI Jakarta No 551 tahun 2001, pada tahun 2008 untuk gas SO<sub>2</sub> dan tahun 2012 untuk gas NO<sub>2</sub>. Dilewatinya BMA akan menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap kondisi sosial dan ekonomi (Ostro, 1994 dan Syahril *et al.*, 2002). Dilewatinya BMA gas SO<sub>2</sub> mulai tahun 2008, akan mengakibatkan sejumlah orang sakit LRI (*lower respiratory illnesses*) pada anak dan sakit CDA (*chest discomfort among adults*), serta adanya orang yang meninggal prematur. Jika kondisi tersebut dibiarkan, dalam arti tidak ada tindakan untuk mengurangi pencemaran gas SO<sub>2</sub>, maka tahun 2025 diprediksi jumlah yang orang sakit dan meninggal akan meningkat secara signifikan. Sedangkan kelebihan konsentrasi gas NO<sub>2</sub> terhadap baku mutunya di udara ambien yang diestimasi mulai terjadi tahun 2012 akan menyebabkan terdapat orang yang sakit sesak nafas. Pada akhir masa simulasi (tahun 2025) jumlah tersebut diprediksi meningkat cukup drastis.

Prediksi biaya kesehatan yang harus dikeluarkan akibat adanya pencemaran gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> sebagai penyebab deposisi asam adalah Rp.985,29 Triliun pada tahun 2025. Biaya kesehatan tersebut diprediksi akan meningkat dari tahun ke tahun, dan hal ini menggambarkan bahwa pencemaran udara merupakan hal yang bersifat kumulatif serta perlu untuk segera diatasi. Bentuk tindakan guna mengatasi dampak negatif pencemaran udara adalah penerapan kebijakan guna mereduksi emisi gas-gas pencemar yang disebabkan oleh kegiatan antropogenik. Kebijakan tersebut dapat merupakan gabungan dari kebijakan berbasis CAC (*command and control*), dalam hal ini berupa penetapan BME dan BMA, serta kebijakan berbasis IE (instrumen ekonomi) berupa denda bagi kegiatan yang emisinya melebihi BME.

Parameter ekonomi yang ditinjau dalam pengembangan model simulasi sistem dinamik meliputi manfaat bersih dan nilai manfaat bersih sekarang (PVnetben). Pada kondisi seperti sekarang, prediksi manfaat bersih yang diperoleh dari nilai penjualan listrik dikurangi dengan biaya kesehatan dan lingkungan akibat pencemaran gas SO<sub>2</sub>

mulai tahun 2021 akan bernilai negatif. Guna mengatasi nilai negatif manfaat bersih yang terdapat pada sub-model pencemaran gas SO<sub>2</sub>, maka dilakukan intervensi struktural dalam sub-model tersebut dengan memberikan variabel kebijakan emisi (kebijakan berbasis lingkungan) dan kebijakan kenaikan harga listrik (kebijakan berbasis ekonomi). Kedua kebijakan tersebut diasumsikan mulai berlaku tahun 2015, hasilnya memperlihatkan bahwa akan terjadi kembali penurunan nilai manfaat bersih mulai tahun 2020. Hasil simulasi ini mengindikasikan perlunya dilakukan evaluasi dan revisi terhadap kebijakan untuk mengatur pencemaran setiap 5 tahun, seperti yang diamanatkan dalam Peraturan Pemerintah Nomor 41 tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara.

Kedua pengembangan model di tahap awal penelitian ini mengindikasikan bahwa parameter ekonomi berpengaruh cukup signifikan terhadap nilai keuntungan penjualan listrik atau nilai manfaat bersih. Hal ini menjadi acuan bagi pengembangan model alternatif kebijakan, yang harus mempertimbangkan adanya kebijakan berbasis insentif ekonomi. Tahap akhir penelitian pengembangan alternatif kebijakan dilaksanakan dengan mengusulkan 3 skenario basis pembangunan, yaitu pembangunan berlangsung seperti sekarang (*business as usual* = *BAU* atau kondisi status quo), atau kebijakan pembangunan yang berbasis ekonomi (*economic driven*), atau kebijakan pembangunan yang berlandaskan lingkungan (*environmental driven*).

Output dari model MCDA berupa antisipasi bahwa kebijakan pembangunan yang berbasis lingkungan lebih baik dibandingkan dengan kebijakan pembangunan berbasis ekonomi ataupun pembangunan seperti sekarang. Bentuk tindakan guna mengatasi dampak negatif pencemaran udara adalah penerapan kebijakan guna mereduksi emisi gas-gas pencemar yang disebabkan oleh kegiatan antropogenik. Kebijakan tersebut dapat merupakan gabungan dari kebijakan berbasis CAC (*command and control*), dalam hal ini berupa penetapan BME dan BMA, serta kebijakan berbasis IE (instrumen ekonomi) berupa denda bagi kegiatan yang emisinya melebihi BME. Disarankan kajian akademik yang menyertai pengembangan suatu kebijakan hendaknya dapat diakses oleh masyarakat guna meningkatkan kesadaran dan komitmen untuk mematuhi.

***@ Hak Cipta milik Institut Pertanian Bogor, Tahun 2008***

***Hak Cipta dilindungi Undang-undang***

- 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumber*
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah*
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar bagi IPB*
- 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis dalam bentuk apapun tanpa izin IPB*

**MODEL KEBIJAKAN UNTUK PENGENDALIAN PENCEMARAN  
DEPOSISI ASAM DI PROVINSI DKI JAKARTA**

**SRI LISTYARINI**

Disertasi  
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Doktor  
pada  
Program Studi Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan

**SEKOLAH PASCASARJANA  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
2008**

Judul Disertasi : Model Kebijakan Untuk Pengendalian Pencemaran  
Deposisi Asam di Provinsi DKI Jakarta  
Nama : Sri Listyarini  
NMR : P062034024  
Program Studi : Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan (PSL)

Disetujui,  
Komisi Pembimbing



Prof. Dr. Ir. Rudy C. Tarumingkeng, MF

Ketua



Prof. Dr. Ir. Akhmad Fauzi, M.Sc

Anggota



Dr. Ir. M. Parulian Hutagaol, M.Sc

Anggota

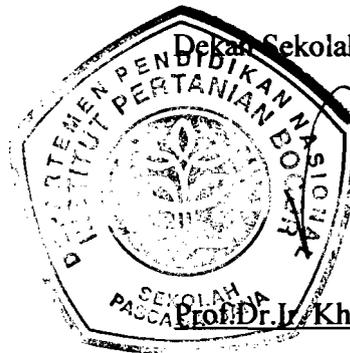
Diketahui,

Ketua Program Studi Pengelolaan  
Sumber Daya Alam dan Lingkungan



Prof. Dr. Ir. Surjono H. Sutjahjo, MS

Tanggal Ujian: 17 Maret 2008



Dekan Sekolah Pascasarjana IPB

Prof. Dr. Ir. Khairil A. Notodiputro MS

Tanggal Lulus:

21 MAY 2008

## PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah swt karena atas ridhoNya penulisan disertasi ini dapat selesai dengan baik. Judul yang penulis pilih adalah Model Kebijakan Untuk Pengendalian Pencemaran Deposisi Asam di Provinsi DKI Jakarta.

Sebagian tulisan dalam disertasi ini telah diterbitkan pada jurnal ilmiah. Tulisan yang pertama berjudul Estimasi Nilai Penurunan Kesehatan Akibat Polusi Gas NO<sub>x</sub> di Udara DKI Jakarta telah terbit di Jurnal Matematika, Sains, dan Teknologi (8: 109-125) pada bulan September 2007. Tulisan kedua berjudul Kurva Lingkungan Kuznet: Relasi Antara Pendapatan Penduduk Terhadap Polusi Udara sedang menunggu penerbitan pada Jurnal Organisasi dan Manajemen, diharapkan dapat terbit di bulan Juni 2008.

Terima kasih penulis sampaikan kepada para pembimbing, yaitu: Prof. Dr. Ir. Rudy C. Tarumingkeng, MF sebagai ketua komisi pembimbing; Prof. Dr. Ir. Akhmad Fauzi, M.Sc, dan Dr. Ir. Parulian Hutagaol, M.Sc, sebagai anggota komisi pembimbing. Komisi pembimbing telah memberikan arahan dan masukan serta pengetahuan yang sangat berarti selama pemilihan topik, pembuatan proposal, penelitian serta penulisan disertasi, sampai dengan penyempurnaannya.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Ir. Bunasor Sanim, MSc. sebagai penguji luar komisi pada ujian tertutup dan penguji luar komisi pada ujian terbuka, yaitu Dr. Henri Bastaman, MES. dan Dr. Ir. Imam Santoso, MSc. Para penguji ini tidak hanya bertindak sebagai penguji dan melaksanakan tugasnya dengan baik pada saat ujian, namun juga memberikan masukan yang sangat berarti bagi penyempurnaan disertasi ini.

Terima kasih juga penulis ucapkan kepada para dosen PSL, kepada ketua program studi PSL, serta kepada Dekan Pascasarjana IPB yang telah memberikan kesempatan serta berbagai pengetahuan selama penulis mengikuti program Pascasarjana di IPB.

Berbagai pihak telah membantu penulis dalam memperoleh data yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu BPS (Badan Pusat Statistik) dan BMG (Badan Meteorologi dan Geofisika) serta BPLHD (Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Daerah) DKI Jakarta, dan juga Badan Pembinaan Keamanan Direktorat Lalu Lintas, Kepolisian Negara

Republik Indonesia (Ditlantas Polri). Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Rektor Universitas Terbuka atas pembiayaan, ijin, dan keleluasaan untuk mengikuti program Pascasarjana IPB. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada rekan-rekan satu kelas S3-PSL yang biasa disebut dengan kelas Kimpraswil, terutama kepada rekan Nuraini Soleiman dan Lina Warlina. Secara khusus, penulis mengucapkan terima kasih kepada suami tercinta (Imam Mustafa Kamal) dan putri tersayang (Nabilla Sahrul Romadhona) atas kasih sayang dan dukungan selama penulis mengikuti perkuliahan dan menyelesaikan disertasi.

Penulis memperoleh bantuan dari berbagai pihak guna menyelesaikan dan menyempurnakan hasil penelitian ini. Namun kesalahan yang mungkin terjadi tetap menjadi tanggung jawab penulis. Semoga hasil penelitian ini bermanfaat bagi banyak pihak. Kiranya Allah swt akan memberikan balasan kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan studi ini.

Bogor, Mei 2008

Sri Listyarini

## RIWAYAT HIDUP

Penulis lahir pada tanggal 7 April 1961 di Jakarta, dari pasangan Tohiran Sastrowardoyo (almarhum) dan Sri Sundari (almarhumah). Penulis bersuamikan Imam Mustafa Kamal dan berputri Nabilla Sahru Romadhona.

Penulis berhasil menyelesaikan pendidikan di Universitas Indonesia, Jakarta pada jurusan Kimia di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam sampai tingkat sarjana di tahun 1985. Melanjutkan pendidikan S-2 pada Fakultas Pendidikan di Simon Fraser University (SFU), Vancouver, Canada dan berhasil memperoleh Magister of Education pada tahun 1990. Penelitian yang dilakukan dalam rangka menyelesaikan pendidikan S-2 di SFU adalah "*Chemistry Laboratory Courses at Distance Education Institutions in Three Different Countries*". Pada awal tahun 2004 menempuh pendidikan S-3 di Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor pada program studi Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan.

Mulai tahun 1986 atau semenjak lulus sarjana bertugas sebagai dosen di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Terbuka (UT) sampai sekarang. Sebagai dosen UT penulis mengampu matakuliah Kimia dan bertanggung jawab atas pengembangan materi pembelajaran dan alat evaluasinya. Penulis telah mengembangkan modul multimedia, yaitu modul tertulis yang dilengkapi dengan media interaktif berupa perangkat lunak komputer yang dikemas dalam CD. Penulis juga pernah mengajar matakuliah Kimia Dasar di Fakultas Teknik, Universitas Katolik Atma Jaya, Jakarta pada tahun 1991 sampai dengan 1994.

Sejak tahun 1990 sampai dengan tahun 2004, selain sebagai dosen, penulis juga diperbantukan di Pusat Komputer Universitas Terbuka. Menjadi kepala Pusat Komputer UT mulai tahun 2000 sampai dengan 2004, yaitu pada saat penulis mengawali kuliah S-3 di IPB. Selama bekerja di Pusat Komputer penulis mengikuti berbagai pelatihan, antara lain pelatihan mengenai sistem pengelolaan database, penggunaan multimedia dan teknologi informasi dalam pendidikan, serta pengembangan sistem bank soal. Pengalaman bekerja di Pusat Komputer UT sangat menunjang studi S-3 penulis dengan penelitian mengenai *modelling*.

## DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI .....	xiv
DAFTAR TABEL .....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xviii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xxi
DAFTAR ISTILAH .....	xxiii
I. PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	8
1.3. Tujuan Penelitian .....	11
1.4. Manfaat Penelitian .....	11
1.5. Ruang Lingkup Penelitian .....	12
II. TINJAUAN PUSTAKA .....	14
2.1. Kondisi Permasalahan Deposisi Asam .....	14
2.2. Deposisi Asam dan Kesejahteraan .....	21
2.3. Konsep Pengendalian Lingkungan .....	32
2.4. Evaluasi Kebijakan .....	36
2.5. Asesmen Kebijakan Lingkungan Melalui Pemodelan .....	43
III. METODE PENELITIAN .....	52
3.1. Kerangka Pemikiran .....	52
3.2. Peta Penelitian dan Teknik Pengembangan Model .....	55
3.2.1. Model Optimasi yang Dikembangkan dengan Metode <i>Goal Programming</i> .....	57

3.2.2.	Model Estimasi yang Dikembangkan dengan Metode Simulasi Sistem Dinamik .....	58
3.2.3.	Model Alternatif Kebijakan yang Dikembangkan dengan Metode Analisis Multi Kriteria.....	61
3.3.	Tempat, Bahan dan Waktu Penelitian .....	61
<b>IV.</b>	<b>ASUMSI DAN PENGEMBANGAN MODEL .....</b>	<b>63</b>
4.1.	Asumsi Umum .....	64
4.2.	Pengembangan Model Optimasi .....	66
4.3.	Pengembangan Model Estimasi. ....	68
4.3.1.	Identifikasi Model Dalam Simulasi Sistem Dinamik .....	68
4.3.1.1.	Identifikasi Variabel dari Data Sekunder .....	69
4.3.1.2.	Identifikasi Persamaan dari Hasil Penelitian Sebelumnya .....	70
4.3.2.	Validasi dan Analisis Sensitivitas Terhadap Model Estimasi .....	78
4.3.2.1.	Uji Validitas .....	78
4.3.2.2.	Uji Sensitivitas .....	79
4.3.2.2.1.	Intervensi Fungsional .....	79
4.3.2.2.2.	Intervensi Struktural .....	87
4.4.	Pengembangan Model Alternatif Kebijakan .....	90
<b>V.</b>	<b>ANALISIS HASIL MODEL YANG DIKEMBANGKAN .....</b>	<b>94</b>
5.1.	Analisis Terhadap Pengembangan Model Optimasi .....	94

5.2.	Analisis Terhadap Pengembangan Model Simulasi Sistem Dinamik .....	97
5.2.1.	Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Konsentrasi Gas SO <sub>2</sub> Dan NO <sub>2</sub> Di Udara Ambien .....	97
5.2.2.	Dampak Pencemaran Gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> di Udara Ambien Terhadap Kondisi Lingkungan, Sosial, dan Ekonomi .....	111
5.3.	Analisis Terhadap Pengembangan Model Alternatif Kebijakan Untuk Mengendalikan Dampak Pencemaran Deposisi Asam .....	121
VI.	ANALISIS KEBIJAKAN .....	127
6.1.	Ekonomi .....	132
6.2.	Lingkungan .....	136
6.3.	Sosial .....	139
6.4.	Penunjang Kebijakan .....	142
6.5.	Analisis Gabungan Antara Hasil Model Terhadap Kebijakan Yang Diusulkan .....	143
VII.	KESIMPULAN DAN SARAN .....	151
7.1.	Kesimpulan .....	151
7.2.	Saran .....	152
	DAFTAR PUSTAKA .....	156
	LAMPIRAN .....	164

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1 Peraturan yang berlaku di provinsi DKI Jakarta terkait dengan pencemaran hujan asam .....	5
Tabel 2 Matriks kebijakan pengendalian lingkungan .....	7
Tabel 3 Data jumlah korban pencemaran udara di dunia tahun 1873-1966 .....	15
Tabel 4 Dampak negatif deposisi asam .....	16
Tabel 5 Analisis terhadap penelitian-penelitian mengenai hujan asam .....	19
Tabel 6 Estimasi hasil EKC dari penelitian Susandi (2004) .....	24
Tabel 7 Satuan biaya kerusakan yang ditimbulkan tiap ton emisi SO <sub>2</sub> .....	30
Tabel 8 Kebijakan nasional yang berkaitan dengan pencemaran deposisi asam .....	38
Tabel 9 Beberapa model untuk menganalisis deposisi asam .....	43
Tabel 10 Matriks keputusan pada metode MCDA .....	49
Tabel 11 Jenis data untuk analisis <i>Goal Programming</i> .....	57
Tabel 12 Jenis dan sumber data yang digunakan dalam penelitian .....	63
Tabel 13 Matriks data sebagai acuan model optimasi .....	66
Tabel 14 Matriks perubahan nilai dalam model optimasi .....	67
Tabel 15 Nilai AME ( <i>absolute means error</i> ) dari model sistem dinamik untuk pencemar gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> .....	78
Tabel 16 Konsentrasi ambien rata-rata bulanan gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> di DKI Jakarta tahun 1995-1999 .....	99
Tabel 17 Perbandingan hasil penelitian Susandi (2004) terhadap penelitian ini .....	103
Tabel 18 Matriks usulan kebijakan sebagai upaya menuju kondisi pembangunan ideal .....	128

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1 Kurva lingkungan Kuznet .....	23
Gambar 2 Grafik tingkat pencemaran yang efisien .....	33
Gambar 3 Kerangka pemikiran penelitian model kebijakan untuk pengelolaan deposisi asam di provinsi DKI Jakarta .....	54
Gambar 4 Peta penelitian: Model kebijakan untuk pengendalian deposisi asam di provinsi DKI Jakarta ( <i>Docking analysis</i> ) .....	56
Gambar 5 Diagram stok-flow simulasi sistem dinamik sub-model pencemaran gas SO <sub>2</sub> .....	76
Gambar 6 Diagram stok-flow simulasi sistem dinamik sub-model pencemaran gas NO <sub>2</sub> .....	77
Gambar 7 Dampak perubahan BMA gas SO <sub>2</sub> terhadap laju degradasi pada sub-model simulasi sistem dinamik SO <sub>2</sub> .....	80
Gambar 8 Dampak perubahan BMA gas SO <sub>2</sub> terhadap jumlah orang meninggal (mortalitas prematur) pada sub-model simulasi sistem dinamik SO <sub>2</sub> ...	81
Gambar 9 Dampak perubahan BMA gas SO <sub>2</sub> terhadap jumlah orang sakit LRI pada sub-model simulasi sistem dinamik SO <sub>2</sub> .....	81
Gambar 10 Dampak perubahan BMA gas SO <sub>2</sub> terhadap jumlah orang sakit CDA pada sub-model simulasi sistem dinamik SO <sub>2</sub> .....	82
Gambar 11 Dampak perubahan harga listrik terhadap nilai manfaat bersih pada sub-model simulasi sistem dinamik SO <sub>2</sub> .....	83
Gambar 12 Dampak perubahan harga listrik terhadap nilai PVNetben pada sub-model simulasi sistem dinamik SO <sub>2</sub> .....	83
Gambar 13 Dampak perubahan BMA gas NO <sub>2</sub> terhadap laju degradasi pada sub-model simulasi sistem dinamik NO <sub>2</sub> .....	84
Gambar 14 Dampak perubahan BMA gas NO <sub>2</sub> terhadap jumlah orang sakit pada sub-model simulasi sistem dinamik NO <sub>2</sub> .....	85

Gambar 15 Dampak perubahan harga listrik terhadap nilai manfaat bersih pada sub-model simulasi sistem dinamik NO <sub>2</sub> .....	86
Gambar 16 Dampak perubahan harga listrik terhadap nilai PVNetben pada sub-model simulasi sistem dinamik NO <sub>2</sub> .....	86
Gambar 17 Hasil intervensi struktural pada diagram stok-flow simulasi sistem dinamik sub-model pencemaran gas SO <sub>2</sub> .....	88
Gambar 18 Dampak intervensi kebijakan terhadap nilai manfaat bersih pada sub-model simulasi sistem dinamik SO <sub>2</sub> .....	89
Gambar 19 <i>Value tree</i> untuk mengidentifikasi kriteria dan sub-kriteria .....	90
Gambar 20 Matriks skenario yang meliputi pembobotan tiap sub-kriteria .....	91
Gambar 21 Informasi preferensi untuk menentukan pilihan <i>score assessment</i> .....	92
Gambar 22 Konsentrasi ambien rata-rata tahunan gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> di DKI Jakarta .....	98
Gambar 23 Jumlah penduduk di provinsi DKI Jakarta tahun 1990-2004 .....	100
Gambar 24 PDRB provinsi DKI Jakarta atas dasar harga konstan 1993 .....	101
Gambar 25 Kurva lingkungan Kuznet hasil penelitian .....	105
Gambar 26 Produksi listrik (juta kWh) di DKI Jakarta tahun 1990-2004 .....	107
Gambar 27 Volume penjualan BBM di DKI Jakarta tahun 1993-2004 .....	108
Gambar 28 Jumlah kendaraan bermotor yang terdaftar di DKI Jakarta .....	109
Gambar 29 Rata-rata curah hujan di DKI Jakarta tahun 1993-2004 .....	110
Gambar 30 Dampak pencemaran gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> terhadap laju degradasi .....	112
Gambar 31 Prediksi peningkatan konsentrasi ambien gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> .....	112
Gambar 32 Prediksi penurunan kondisi sosial akibat pencemaran gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> .....	114
Gambar 33 Prediksi nilai orang yang meninggal akibat pencemaran gas SO <sub>2</sub> terhadap nilai PDRB .....	115
Gambar 34 Prediksi nilai biaya kesehatan akibat pencemaran gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> ..	116
Gambar 35 Prediksi nilai manfaat bersih akibat pencemaran gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> ....	118
Gambar 36 Prediksi nilai PVNetben karena pencemaran gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> .....	119

Gambar 37 Perbandingan prediksi nilai manfaat bersih karena pencemaran gas SO <sub>2</sub> dengan adanya kebijakan .....	120
Gambar 38 Hasil <i>value interval</i> .....	122
Gambar 39 Hasil <i>weights</i> (pembobotan) .....	122
Gambar 40 Hasil matriks dominan .....	124
Gambar 41 Hasil <i>decision rules</i> .....	125

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1	Tabel data penelitian ..... 164
Lampiran 2	Output dari General Algebraic Modeling System (GAMS) ..... 165
Lampiran 3	Hasil pengolahan data pada model optimasi dengan berbagai skenario ..... 170
Lampiran 4	Proses identifikasi variabel yang mempengaruhi konsentrasi ambien gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> ..... 171
Lampiran 5	Tabel data pertumbuhan penduduk, PDRB, kendaraan, BBM, dan produksi listrik di DKI Jakarta ..... 180
Lampiran 6	Algoritma Vensim untuk sub-model pencemaran gas SO <sub>2</sub> ..... 181
Lampiran 7	Algoritma Vensim untuk sub-model pencemaran gas NO <sub>2</sub> ..... 189
Lampiran 8	Data hasil simulasi sistem dinamik untuk sub-model pencemar gas SO <sub>2</sub> ..... 196
Lampiran 9	Data hasil simulasi sistem dinamik untuk sub-model pencemar gas NO <sub>2</sub> ..... 200
Lampiran 10	Perubahan algoritma Vensim pada intervensi struktural sub-model pencemaran gas SO <sub>2</sub> ..... 204
Lampiran 11	Matriks variabel acuan dalam pengembangan model alternatif kebijakan ..... 205

Lampiran 12	Data hasil simulasi sistem dinamik untuk mengembangkan model alternatif kebijakan .....	206
Lampiran 13	Perbandingan data hasil simulasi sistem dinamik pada sub-model pencemaran gas SO <sub>2</sub> .....	207

## DAFTAR ISTILAH

**Abatement cost:** biaya yang dikeluarkan untuk mengurangi atau mereduksi jumlah pencemar, bukan untuk meniadakan pencemar

**AME (*absolute means error*):** penyimpangan antara nilai rata-rata simulasi terhadap nilai aktual, makin kecil nilainya akan semakin baik

**Analisis multi kriteria (*multi criteria decision analysis/ MCDA*):** cara pemilihan alternatif terbaik dengan mempertimbangkan setiap kriteria dari beberapa alternatif yang ada

**Atur diri sendiri (*do it yourself*):** salah satu bentuk kebijakan dimana pelaku kegiatan yang dapat mencemari udara diharuskan untuk memantau emisi yang dikeluarkan dan melaporkannya kepada instansi pemerintah terkait

**Bahan bakar fosil (BBF):** bahan organik yang terbentuk secara alamiah dalam bumi dan hasil pembakarannya merupakan sumber energi, seperti bahan bakar minyak (BBM), batu bara, dan gas

**Bahan bakar minyak (BBM):** bahan organik berfasa cair yang terbentuk secara alamiah dalam bumi dan hasil pembakarannya merupakan sumber energi, merupakan bagian dari BBF

**Baku mutu udara ambien (BMA):** adalah ukuran batas atau kadar zat, energi, dan/atau komponen yang ada atau yang seharusnya ada dan/atau unsur pencemar yang ditenggang keberadaannya dalam udara ambien

**Baku mutu emisi (BME):** adalah batas kadar maksimum dan/atau beban emisi maksimum yang diperbolehkan masuk atau dimasukkan ke dalam udara ambien

**Bapedalda atau BPLHD:** Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Daerah

**BAPPENAS:** Badan Perencanaan Pembangunan Nasional

**BMG:** Badan Meteorologi dan Geofisika

**BPS:** Badan Pusat Statistik

**CDA (*chest discomfort among adults*):** penyakit sesak nafas pada orang dewasa akibat adanya partikel bersifat asam yang memasuki sistem pernafasan

**CAC (*command and control*):** salah satu bentuk kebijakan dimana pemerintah menetapkan dan memantau pelaksanaan dari peraturan-peraturan dan standar yang harus dipatuhi oleh penanggung jawab kegiatan yang berpotensi mencemari udara

**Deposisi asam:** atau Hujan asam adalah istilah untuk menggambarkan apa yang akan terjadi apabila partikel-partikel yang bersifat asam di atmosfer jatuh atau turun ke permukaan bumi

**Derajat keasaman (pH):** dinyatakan dengan nilai pH (eksponen Hidrogen), yang memiliki rentangan nilai 0 sampai dengan 14. Nilai  $\text{pH} = 0$  menyatakan tingkat keasaman maksimum, sedangkan  $\text{pH} = 14$  menyatakan tingkat basa (lawannya asam) maksimum. Semakin kecil nilai pH semakin asam sifat suatu materi

**Diagram *stock flow*:** diagram yang terdiri dari *stock* dan *flow* dalam pengembangan model simulasi sistem dinamik. *Stock* dan *Flow* dapat dianalogikan dengan bak air dan keran air atau aliran keluar atau masuk dari dan ke *stock*. Cara pengosongan atau pengisian *stock* digambarkan dengan *link*-nya terhadap berbagai variabel atau konstanta

**Ekosistem:** adalah tatanan unsur lingkungan hidup yang merupakan kesatuan utuh menyeluruh dan saling mempengaruhi dalam membentuk keseimbangan, stabilitas, dan produktivitas lingkungan hidup

**Eksternalitas:** merupakan keuntungan atau kerugian yang diakibatkan oleh transaksi ekonomi dari satu pihak yang mengakibatkan dampak kepada pihak ketiga, dan pihak pelaku aktivitas tidak menyediakan kompensasi terhadap pihak yang menerima dampak eksternalitas

**Elastisitas energi:** adalah perbandingan antara pertumbuhan konsumsi energi dengan pertumbuhan ekonomi, makin rendah nilai elastisitas energi makin efisien penggunaan energi

**Emisi:** adalah zat, energi dan/atau komponen lain yang dihasilkan dari suatu kegiatan yang masuk dan/atau dimasukkan ke dalam udara ambien yang mempunyai dan/atau tidak mempunyai potensi sebagai unsur pencemar

**Faktor Emisi (*emission factor*):** merupakan nilai statistik yang menunjukkan perkiraan jumlah polutan yang akan diemisikan oleh suatu sumber emisi. Nilai Faktor Emisi ditampilkan dalam satuan berat polutan per unit berat, volume, jarak, atau durasi dari suatu sumber emisi

**Fungsi *dose-response*:** fungsi untuk menghitung dampak emisi polutan terhadap ekosistem, karena adanya perubahan konsentrasi polutan

**General algebraic modelling system (GAMS):** perangkat lunak untuk melakukan analisis dengan metode *Goal Programming*

**Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU):** adalah angka yang tidak mempunyai satuan yang menggambarkan kondisi mutu udara ambien di lokasi tertentu, yang didasarkan kepada dampak terhadap kesehatan manusia, nilai estetika dan makhluk hidup lainnya

**Insentif ekonomi (*economic incentives*):** salah satu bentuk kebijakan yang mendorong pelaku kegiatan agar menurunkan polusi yang dihasilkan dengan biaya seminimal mungkin

**Intensitas energi:** adalah perbandingan antara jumlah konsumsi energi per PDB (Produk Domestik Bruto); semakin efisien penggunaan energi suatu negara, maka nilai intensitasnya semakin kecil

**Kilowatt hour (kWh):** pengukuran listrik yang didefinisikan sebagai satuan energi atau daya sebesar 1000 watt (kilowatt) yang dialirkan selama 1 jam

**Kurva lingkungan Kuznet (*environmental Kuznets curve* atau EKC):** merupakan kurva dengan bentuk U terbalik yang menggambarkan hubungan antara pertumbuhan ekonomi terhadap tingkat degradasi lingkungan

**LRI (*lower respiratory illnesses*):** penyakit pernafasan pada anak akibat adanya partikel bersifat asam yang memasuki sistem pernafasan

**MAC (*marginal abatement cost*):** penambahan biaya abatement (*abatement cost*) akibat pengurangan satu unit pencemaran

**MDC (*marginal damage cost*):** biaya yang harus dikeluarkan oleh masyarakat karena adanya kerusakan lingkungan

**Metode *goal programming* (GP):** metode yang digunakan untuk menghubungkan antara tujuan (*objective*) dan hambatan (*constraint*) yang tidak seluruhnya lengkap sebagai upaya untuk meminimalkan deviasi dari multi tujuan terhadap performans relatifnya

**Metode *ordinary least square* (OLS):** metode yang digunakan untuk melihat hubungan antar variabel, dengan menggunakan fungsi regresi

**Model dispersi:** model untuk memperkirakan bagaimana faktor-faktor iklim dan perubahan emisi polutan mempengaruhi konsentrasinya di atmosfer

**Model simulasi sistem dinamik:** model untuk menirukan perilaku suatu gejala dengan tujuan untuk memahami gejala tersebut, dengan cara membuat analisis dan peramalan perilaku gejala dimasa yang akan datang

**Mortalitas prematur:** kematian dini yang (dalam penelitian ini dianggap) diakibatkan oleh pencemaran udara

**NO<sub>x</sub> (oksida nitrogen):** meliputi gas NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, serta N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, namun nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>) merupakan komponen yang paling dominan sehingga NO<sub>x</sub> biasanya direpresentasikan sebagai NO<sub>2</sub>

**PDB (produk domestik bruto):** diartikan sebagai nilai keseluruhan semua barang dan jasa yang diproduksi di dalam suatu wilayah dalam jangka waktu tertentu (biasanya per tahun)

**PDRB (produk domestik regional bruto):** adalah besarnya pendapatan yang timbul oleh karena adanya kegiatan produksi barang dan jasa yang dihasilkan oleh faktor produksi yang dimiliki oleh penduduk di daerah tertentu

**Pencemaran udara:** adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya

**Pencemaran udara berskala lokal (mikro):** adalah pencemaran dengan orde jangkauan sampai satuan kilometer, dan skala waktu dalam orde detik sampai beberapa menit

**Pencemaran udara berskala regional (meso):** pencemaran yang memiliki orde jangkauan sampai dengan seratus kilometer, dan skala waktu dalam orde menit sampai beberapa jam atau satu hari

**Pencemaran udara berskala global (makro):** merupakan pencemaran berorde jangkauan di atas seratus kilometer dengan skala waktu lebih lama dari satu hari

**Perintah dan kendalikan (*command and control* = *CAC*):** salah satu bentuk kebijakan dimana pemerintah menetapkan dan memantau pelaksanaan dari peraturan-peraturan dan standar yang harus dipatuhi oleh penanggung jawab kegiatan yang berpotensi mencemari udara

**PM<sub>10</sub> (*Particulate Matter 10*):** partikel dengan diameter di bawah 10 µm (dibaca sepuluh mikron atau mikro meter atau 10<sup>-6</sup> meter)

**PRIME (*preference ratios in multiattribute evaluation*):** perangkat lunak untuk melakukan analisis multi kriteria (*multi criteria decision analysis* atau MCDA)

**RSD (*respiratory symptoms diseases*):** penyakit gangguan pernafasan akibat polusi gas NO<sub>x</sub> di udara ambien

**SO<sub>x</sub> (oksida sulfur):** terdiri dari sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), sulfur trioksida (SO<sub>3</sub>), asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) dan asam sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), namun SO<sub>2</sub> merupakan bagian yang paling dominan, sehingga SO<sub>x</sub> biasanya diukur sebagai SO<sub>2</sub>

**Sumber emisi:** setiap usaha dan/atau kegiatan yang mengeluarkan emisi dari sumber bergerak maupun sumber tidak bergerak

**Sumber bergerak:** sumber emisi yang bergerak atau tidak tetap pada suatu tempat, seperti emisi yang berasal dari kendaraan bermotor

**Sumber tidak bergerak:** sumber emisi yang tetap berada pada suatu tempat

**TDP (*transferable discharge permit*):** ijin mencemari lingkungan yang merupakan instrumen yang dapat diperjual-belikan antar institusi pengemisi polutan, agar jumlah pencemar yang paling efisien dapat tercapai

***Transboundary air pollution:*** polusi udara lintas batas, yaitu polusi udara yang sumber emisinya berada jauh dari reseptor (penerima) polutan

**Udara ambien:** udara bebas dipermukaan bumi pada lapisan troposfir yang dibutuhkan dan mempengaruhi kesehatan manusia, makhluk hidup dan unsur lingkungan hidup lainnya

**Vensim:** perangkat lunak untuk mengembangkan model simulasi sistem dinamik

**VOSL (*value of a statistical life*):** valuasi ekonomi dampak kesehatan yang berupa kematian prematur, pada penelitian ini nilainya adalah Rp. 1.351.440.000,-

**Waktu paruh (*half-life*):** waktu yang dibutuhkan suatu zat untuk mengurangi konsentrasi sampai setengah dari konsentrasi awalnya

**WPM (*weighted product model*):** menghitung nilai preferensi dari masing-masing alternatif dengan rumus perkalian. Tiap alternatif dibandingkan terhadap alternatif yang lain melalui perkalian dari angka perbandingan (rasio) tiap-tiap kriteria, alternatif terbaik adalah alternatif yang memiliki nilai rasio tertinggi

**WSM (*weight sum model*):** menghitung nilai preferensi dari masing-masing alternatif dengan rumus penjumlahan, alternatif terbaik dalam WSM adalah yang memiliki nilai preferensi terbesar

## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Deposisi asam atau hujan asam adalah istilah untuk menggambarkan apa yang akan terjadi apabila partikel-partikel yang bersifat asam di atmosfer jatuh atau turun ke permukaan bumi (Howells, 1995)<sup>1</sup>. Partikel-partikel polutan tersebut antara lain berupa gas sulfur oksida ( $\text{SO}_x$ ) dan nitrogen oksida ( $\text{NO}_x$ ) yang bereaksi dengan air. Deposisi asam dapat diakibatkan oleh proses alami seperti gunung meletus dan petir, serta emisi gas  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$  oleh manusia (antropogenik). Emisi antropogenik terjadi akibat berbagai kegiatan manusia, seperti: pembakaran bahan bakar fosil (BBF), proses penambangan Cu (tembaga), dan pembakaran sisa panen (Barrow, 1991). Dalam penelitian ini sumber emisi gas  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$  yang diamati dibatasi hanya akibat kegiatan manusia dalam pembakaran BBF sebagai sumber energi.

Derajat keasaman suatu materi dinyatakan dengan nilai pH (eksponen Hidrogen), yang memiliki rentangan nilai 0 sampai dengan 14. Nilai pH = 0 menyatakan tingkat keasaman maksimum, sedangkan pH = 14 menyatakan tingkat basa (lawannya asam) maksimum. Untuk materi yang bersifat netral nilai pH = 7. Jadi semakin kecil nilai pH semakin asam sifat suatu materi.

Menurut Kennedy (1992) dan Howells (1995) pH air hujan yang normal memang sudah relatif asam, yaitu sekitar 5,6. Keasaman air hujan ini disebabkan oleh adanya gas  $\text{CO}_2$  yang secara alami berada di udara ambien, dan bereaksi dengan air membentuk asam lemah  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . Namun menurut Soedomo (2001) pH air hujan tidak lagi digunakan sebagai indikator hujan asam atau deposisi asam, melainkan dengan kadar oksida sulfur dan nitrogen di udara ambien. Lebih lanjut Soedomo menyatakan bahwa oksida sulfur ( $\text{SO}_x$ ) biasanya terdiri atas sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ), sulfur trioksida ( $\text{SO}_3$ ), asam sulfit ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) dan asam sulfat ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Namun sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) merupakan bagian yang paling dominan, sehingga oksida-oksida sulfur biasanya diukur sebagai  $\text{SO}_2$ . Demikian juga dengan oksida nitrogen ( $\text{NO}_x$ ) biasanya direpresentasikan sebagai  $\text{NO}_2$ . Hal ini

---

<sup>1</sup> Istilah deposisi asam atau hujan asam pertama kali dikemukakan oleh seorang ahli kimia Inggris Angus Smith tahun 1850 (Howells, 1995)

menjadi dasar pemantauan kadar polutan di udara ambien yang dilakukan di stasiun BMG Jakarta, yang antara lain berupa pengukuran terhadap konsentrasi rata-rata gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>.

Mengapa polusi deposisi asam perlu diperhatikan? Keinginan manusia untuk memperbaiki kualitas hidup selalu diikuti dengan penambahan kebutuhan energi (Stern, 2004). Kebutuhan energi sebagian besar dipenuhi melalui pembakaran BBM, yang mengemisikan gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>, tentunya juga meningkatkan polusi deposisi asam. Keterkaitan yang erat antara polusi deposisi asam dengan keinginan manusia untuk meningkatkan kesejahteraan merupakan hal yang menarik untuk diteliti. Selain itu deposisi asam sudah merupakan polusi yang menjadi perhatian dunia, karena dampak negatif yang ditimbulkannya sangat luas.

Emisi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di suatu wilayah dapat menyebabkan deposisi asam di wilayah lainnya, karena gas-gas penyebab deposisi asam tersebut dapat terbawa oleh angin menjauhi sumber emisinya. Sifat polusi deposisi asam yang demikian dikatakan sebagai polusi lintas batas (*transboundary air pollution*), sehingga polusi ini menjadi keprihatinan dunia, mengingat dampak negatif deposisi asam dapat berlangsung antar wilayah bahkan antar negara. Selain itu deposisi asam merusak seluruh lingkungan, baik lingkungan biotik seperti manusia, hewan, dan tanaman maupun lingkungan abiotik seperti bangunan, tanah, dan air.

Guna mengatasi pencemaran deposisi asam telah banyak dibuat kesepakatan antar negara dalam upaya untuk mereduksinya. Dunia menyadari bahwa pencemaran deposisi asam tidak mungkin dihilangkan. Karena hanya sebagian kecil dari pencemaran ini yang dihasilkan secara alamiah dan sebagian besar terkait erat dengan kegiatan antropogenik untuk menghasilkan energi. Upaya untuk mereduksi polusi deposisi asam dilakukan baik melalui teknologi maupun metodologi, yang secara umum dikategorikan sebagai kegiatan abatemen. Tentunya kegiatan ini memerlukan biaya, yang disebut sebagai biaya abatemen (*abatement cost*), yang didefinisikan sebagai biaya yang dikeluarkan untuk mengurangi atau mereduksi jumlah pencemar, bukan untuk meniadakan pencemar. Di tingkat internasional telah banyak biaya yang dikeluarkan untuk melaksanakan abatemen terhadap polusi deposisi asam (Burtraw *et al.*, 1997; Lvovsky *et al.*, 2000; Menz dan Seip, 2004; Nakada dan Pearce, 1998).

Indonesia telah meratifikasi berbagai kesepakatan internasional guna mengelola kualitas udara, meskipun demikian pencemaran deposisi asam tetap terjadi dalam skala yang cukup luas. Laporan mengenai kualitas udara di Indonesia yang dikeluarkan oleh Bapedal (2000) menyatakan bahwa pemantauan selama tahun 1994 sampai dengan tahun 1998 di 10 kota besar menunjukkan lebih dari 90% pH air hujan di Jakarta, Bandung, Surabaya, Makassar, dan Jayapura sudah bersifat asam. Laporan tersebut mengindikasikan bahwa deposisi asam sudah terjadi di berbagai kota besar di Indonesia. Darmono (2001) menyatakan rata-rata pH air hujan di Jakarta terus menurun, pada tahun 1990 sekitar 5,75 dan tahun 1995 menjadi 5,23.

Deposisi asam atau hujan asam sebagian besar disebabkan oleh penggunaan BBF sebagai sumber energi, dilain pihak gaya hidup penduduk di kota-kota besar seperti Jakarta cenderung bersifat hedonis sehingga penggunaan BBF sebagai sumber energi terus meningkat. Padahal belum tentu konsumsi BBF tersebut tepat sebagai sumber energi, karena selain BBF juga terdapat sejumlah alternatif sumber energi. Selain itu penggunaan energi di Jakarta lebih banyak untuk keperluan konsumsi bukan produksi. Hal ini dinyatakan dengan nilai elastisitas energi Indonesia tahun 1985-2000 yang berada pada kisaran 1,04–1,35, sedangkan nilai elastisitas energi negara-negara maju pada kurun waktu yang sama berada pada kisaran 0,55–0,65 (Elyza dan Hulaiyah, 2005). Elastisitas energi adalah perbandingan antara pertumbuhan konsumsi energi dengan pertumbuhan ekonomi. Makin tinggi nilai elastisitas energi, makin besar energi yang dibutuhkan untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi. Jika penggunaan energi lebih besar untuk produksi dibandingkan dengan konsumsi, maka sebagian dari keuntungan produksi dapat digunakan untuk memperbaiki kerusakan lingkungan yang ditimbulkan akibat penggunaan energi.

Peningkatan kebutuhan energi, terutama yang berasal dari BBF, yang semakin besar menyebabkan diperlukannya pengetahuan seberapa besar sesungguhnya kebutuhan BBF untuk memenuhi kebutuhan energi penduduk. Masyarakat perlu memahami bahwa penggunaan BBF sebagai sumber energi secara berlebihan akan menyebabkan polusi deposisi asam, yang dampak negatifnya sangat merugikan kita semua. Pemahaman tersebut diharapkan dapat mengubah perilaku penduduk Jakarta yang hedonis, terutama dalam kaitannya dengan penggunaan BBF sebagai sumber energi.

Selama ini kebijakan-kebijakan yang dikembangkan pemerintah belum memperhitungkan gaya hidup yang hedonis tersebut. Karena itu diperlukan penelitian sebagai bentuk kompromi sosial antara kebutuhan masyarakat akan energi melalui pembakaran BBF dengan keprihatinan pemerintah akan meningkatnya polusi udara, terutama yang berupa deposisi asam. Adanya kontradiksi antara perilaku masyarakat dalam menggunakan BBF sebagai sumber energi dan keinginan untuk mereduksi pencemaran udara memerlukan kebijakan yang bersifat kompromis.

Tingginya kebutuhan energi penduduk DKI Jakarta diperlihatkan oleh data penjualan BBM (Bahan Bakar Minyak) yang terus menunjukkan peningkatan secara signifikan. Dengan kondisi penjualan BBM yang terus meningkat, dapat dimengerti mengapa pencemaran udara di DKI Jakarta juga meningkat. Selain menggunakan BBM, yang merupakan bagian dari BBF, sektor industri dan rumah tangga juga menggunakan listrik yang disuplai oleh PLN (Perusahaan Listrik Negara) sebagai sumber energi. Produk listrik yang dihasilkan oleh PLN menggunakan BBF yang berupa batubara sebagai bahan bakunya, yang juga mengemisikan gas-gas pencemar ke udara ambien, termasuk gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  yang merupakan penyebab polusi deposisi asam.

Selain dari data volume penjualan BBM dan penggunaan listrik di DKI Jakarta yang terus meningkat, penelitian-penelitian mengenai kualitas udara di wilayah ini juga menghasilkan prediksi yang sama. Studi yang dilakukan oleh Syahril *et al.* (2002) mengenai kualitas udara Jakarta menunjukkan bahwa emisi gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  pada tahun 1995 sampai dengan tahun 1998 terus meningkat. Penelitian tersebut juga memprediksi bahwa peningkatan emisi gas-gas penyebab deposisi asam masih akan terus terjadi sampai tahun 2015. Pada skala yang lebih luas penelitian Susandi (2004 dan 2004a) juga memprediksi akan adanya peningkatan emisi gas  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$  di Indonesia sampai dengan tahun 2060.

Penelitian mengenai deposisi asam menjadi menarik, karena selain terkait erat dengan upaya setiap manusia untuk meningkatkan kualitas hidup, polusi deposisi asam juga sangat luas dampak negatifnya. Mengingat bahaya deposisi asam yang begitu luas dan adanya peningkatan penggunaan BBF serta prediksi peningkatan emisi gas-gas penyebab deposisi asam ke udara ambien, maka pemerintah provinsi (Pemprov) DKI

Jakarta telah mengembangkan berbagai kebijakan guna mengelola kualitas udara. Beberapa kebijakan yang terkait dengan polusi deposisi asam dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Peraturan yang berlaku di provinsi DKI Jakarta terkait dengan pencemaran deposisi asam

No	Judul Peraturan Daerah	Isi Peraturan Daerah
1	Keputusan Gubernur DKI No 670 tahun 2000 tentang Penetapan Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak di Provinsi DKI Jakarta	Menetapkan pemberlakuan BME gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> bagi berbagai jenis industri, yaitu: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Industri besi dan baja: emisi maksimum SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> adalah 800 dan 1000 (mg/m<sup>3</sup>)</li> <li>- Pembangkit listrik tenaga uap: emisi maksimum SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> adalah 750 dan 850 (mg/m<sup>3</sup>)</li> <li>- Ketel uap (<i>power boiler</i>): emisi maksimum SO<sub>2</sub> dan NO<sub>x</sub> adalah 800 dan 1000 (mg/m<sup>3</sup>)</li> <li>- Industri lain bukan logam: emisi maksimum SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> adalah 800 dan 1000 (mg/m<sup>3</sup>)</li> </ul>
2	Keputusan Gubernur DKI No 1041 tahun 2000 tentang Baku Mutu Udara Emisi Kendaraan Bermotor di Provinsi DKI Jakarta	Menetapkan pemberlakuan BME gas-gas yang diemisikan berbagai jenis kendaraan berdasarkan tahun pembuatannya. Gas yang ditentukan BMEnya pada peraturan daerah ini hanya CO (karbon monoksida) dan HC (hidrokarbon).
3	Keputusan Gubernur DKI No 551 tahun 2001 tentang Penetapan Baku Mutu Udara Ambien dan Baku Tingkat Kebisingan di Provinsi DKI Jakarta	Menetapkan pemberlakuan baku mutu ambien untuk berbagai gas pada berbagai pengukuran, antara lain gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> . Untuk gas SO <sub>2</sub> yang diukur pada 1 tahun baku mutunya 0,02 ppm (60 µg/Nm <sup>3</sup> ). Untuk gas NO <sub>2</sub> yang diukur pada 1 tahun baku mutunya adalah 0,03 ppm (60 µg/Nm <sup>3</sup> ).
4	Peraturan Daerah Provinsi Daerah Khusus Ibukota Jakarta Nomor 2 Tahun 2005 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara	Perda ini bertujuan agar sumber pencemar udara terkendali, sehingga tercapai kualitas udara yang memenuhi syarat kesehatan manusia dan makhluk hidup lainnya. Pengendalian mutu udara ambien didasarkan pada baku mutu udara ambien, status mutu udara ambien, baku mutu emisi, ambang batas emisi gas buang, baku tingkat gangguan, ambang batas kebisingan dan Indeks Standar Pencemar Udara.

Selama ini masyarakat hanya dapat mengakses kebijakan-kebijakan tersebut dalam bentuk aturan-aturan yang sudah baku, sedangkan alasan mengapa kebijakan tersebut diberlakukan belum diketahui oleh publik. Lebih jauh lagi, berbagai kebijakan yang berlaku pada tingkat provinsi tersebut tentunya dikembangkan melalui serangkaian studi. Sayangnya studi yang menyertai pengembangan peraturan mengenai pengelolaan pencemaran udara belum dapat diakses oleh masyarakat luas.

Dengan mengetahui studi ataupun landasan logis yang menjadi dasar suatu kebijakan lingkungan tentunya masyarakat akan memahami pentingnya mentaati kebijakan. Pemahaman tersebut akan meningkatkan komitmen masyarakat dalam mengubah perilakunya guna mengurangi penggunaan BBF sebagai sumber energi, sehingga emisi gas-gas penyebab deposisi asam akan berkurang. Selain itu pemahaman terhadap kebijakan berbasis lingkungan akan meningkatkan kesadaran masyarakat untuk melaksanakan konservasi lingkungan. Selama ini masyarakat kurang memahami pentingnya kebijakan lingkungan yang berlaku, karena hampir setiap kebijakan yang ada lebih dilandasi oleh kepentingan ekonomi. Misalnya kebijakan mengenai lingkungan udara, yang selama ini berlaku merupakan penetapan standar yang berupa BME (baku mutu emisi) dan BMA (baku mutu udara ambien), serta denda bagi penanggung jawab kegiatan yang emisinya melebihi BME. Jika masyarakat diberi pemahaman bahwa mereka juga akan mengalami kerugian bila tidak mentaati kebijakan lingkungan yang telah ditetapkan, tentunya masyarakat akan melaksanakan kebijakan tersebut dengan penuh kesadaran.

Kebijakan yang berkaitan dengan pencemaran deposisi asam termasuk kebijakan mengenai lingkungan. Sedangkan kebijakan mengenai lingkungan merupakan kebijakan publik, yang menurut McTaggart *et al.* (1996) adalah kebijakan yang sulit untuk dianalisis secara mendalam. Menurut Soemarwoto (2004) secara umum kebijakan mengenai polusi yang merupakan bagian dari kebijakan lingkungan dapat dibagi menjadi 3 golongan, yaitu berbasis: perintah dan kendalikan (*command and control* atau CAC), insentif ekonomi (*economic incentive* atau EI), dan atur diri sendiri (*do it yourself* atau DIY). Dari kebijakan-kebijakan yang telah dikeluarkan oleh pemerintah provinsi (Pemprov) DKI Jakarta, seperti terlihat pada Tabel 1, dapat disimpulkan bahwa kebijakan

tersebut berbasis CAC. Sanim (2005) memberikan ulasan singkat mengenai kekuatan dan kelemahan dari ketiga golongan kebijakan pengendalian lingkungan, yang dinyatakan dalam matriks berikut:

Tabel 2 Matriks kebijakan pengendalian lingkungan

Perihal	CAC	EI	DIY
Mekanisme	Mekanisme Non-Pasar	Mekanisme Pasar	Mekanisme Non-Pasar
Penyesuaian	<i>Control and command</i>	<i>Self adjustment</i>	Kontrol Sosial
Biaya Pengawasan Pajak dan kaitannya dengan struktur biaya	Relatif mahal	Relatif efisien	Relatif murah
	Seragam: tidak ada sistem insentif	Beragam: ada sistem insentif	Tidak ada insentif

Sumber: Sanim (2005)

Dari matriks di atas terlihat bahwa konsep CAC, berupa penetapan BMA dan BME, yang dianut oleh Pemprov DKI Jakarta dalam mengelola lingkungan memiliki beberapa kelemahan, antara lain mahalnya biaya pengawasan dan tidak adanya sistem insentif bagi institusi yang mengemisikan pencemar untuk mereduksi pencemarannya. Selain itu kebijakan CAC tidak melibatkan sektor sosial atau para *stakeholders* dalam penyesuaiannya.

Hanya dengan pengendalian yang sangat ketat dari pemerintah kebijakan CAC dapat berjalan efektif. Sedangkan dalam kasus pencemaran deposisi asam, Pemprov DKI Jakarta belum memiliki prosedur kontrol yang dapat secara efektif memonitor jumlah emisi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> dari berbagai sumber. Belum adanya kebijakan mengenai monitoring menyebabkan belum dapat diterapkan sistem penalti bagi institusi yang melanggar ketentuan BME, sehingga pengendalian terhadap emisi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> masih sulit dilaksanakan.

Kebijakan CAC dengan menetapkan BMA dan BME berkesan ingin menghilangkan pencemaran sehingga kebijakan tersebut tidak dapat berfungsi secara efektif. Padahal, sesungguhnya pencemaran tidak mungkin ditiadakan sebab pencemaran bersifat *pervasive* akibat kegiatan ekonomi (Fauzi, 2004). Selain itu pada kebijakan CAC masyarakat tidak diberi kesempatan memilih akibat ketiadaan pengendalian pasar. Padahal menurut Ratnaningsih (2007) kebijakan berbasis pengendalian pasar dapat

digunakan sebagai sumber pendapatan daerah sekaligus sebagai alat pengatur kegiatan ekonomi. Untuk itu perlu dikembangkan kebijakan yang didasarkan pada kaidah-kaidah akademik dengan mempertimbangkan konsep pengendalian pasar, agar dasar pengembangan kebijakan menjadi lebih kuat dan relatif lebih mudah untuk dipatuhi oleh masyarakat luas.

Peraturan-peraturan yang dikeluarkan oleh Pemprov DKI Jakarta guna menjaga kualitas udara dirasa belum berfungsi secara efektif. Hal ini terlihat dari hasil pengamatan dilakukan secara harian atau bulanan yang menunjukkan bahwa konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di Jakarta telah melebihi batas ambang. Padahal dengan dilewatinya batas ambang tersebut diprediksi agar terjadi dampak negatif, yang jika dinilai dengan uang nilainya tidak seikit. Untuk itu dirasa perlu untuk melakukan penelitian dalam rangka mereformulasikan kebijakan yang ada dengan cara membangun alternatif kebijakan yang diharapkan dapat berfungsi secara efektif untuk mereduksi polusi deposisi asam. Batasan persoalan dan masalah dalam penelitian ini disajikan pada sub-bab berikut.

## **1.2. Perumusan masalah**

Dari penjelasan pada sub-bab latar belakang terlihat bahwa peraturan atau kebijakan yang telah dikembangkan oleh Pemprov DKI Jakarta dirasakan belum cukup efektif dalam mengelola kualitas udara. Hal ini diprediksi akan meningkatkan polusi deposisi asam. Terdapat beberapa kelemahan dalam kebijakan lingkungan udara yang selama ini berlaku di DKI Jakarta, antara lain karena kebijakan tersebut berbasis CAC tentunya memerlukan kegiatan monitoring yang cukup ketat. Selama ini monitoring yang dilakukan Pemprov DKI tidak begitu ketat, bahkan pada beberapa kasus hasil monitoring belum dapat ditindaklanjuti (Pemprov DKI Jakarta, 2006). Kurangnya monitoring pada kebijakan berbasis CAC akan menyebabkan berkurangnya ketaatan masyarakat. Terlebih lagi masyarakat dan pemerintah belum menganggap masalah pencemaran udara sebagai masalah yang menjadi prioritas untuk ditangani, mengingat masih banyak problema yang mendesak di ibukota Jakarta seperti banjir dan kemacetan. Padahal pencemaran udara, terutama yang berupa deposisi asam, memiliki dampak negatif yang sangat luas dan

merugikan seluruh masyarakat. Di samping itu penanganan pencemaran udara berkaitan erat dengan penanggulangan kemacetan.

Pengembangan kebijakan lingkungan udara yang berbasis pada CAC dirasakan kurang memberikan keleluasaan bagi masyarakat dalam mengelola kualitas udara. Kebijakan pengelolaan kualitas udara yang berlaku di provinsi DKI Jakarta selama ini berupa penetapan-penetapan standar, baik dalam bentuk BME maupun BMA (lihat Tabel 1). Pelaku kegiatan yang mengemisikan polutan ke udara tidak memiliki pilihan selain mematuhi standar yang berupa BME atau membayar denda apabila emisinya sudah melampaui BME. Padahal selain CAC juga terdapat mekanisme pasar yang dapat digunakan untuk mengelola lingkungan, dimana pelaku kegiatan emisi dapat memilih berbagai alternatif untuk mereduksi emisinya berdasarkan perhitungan ekonomi. Untuk itu diperlukan model pengembangan kebijakan yang tidak hanya berdasarkan pada kebijakan CAC tetapi juga memberikan peluang bagi pengendalian pasar. Pengembangan kebijakan haruslah didasarkan pada kaidah-kaidah akademik, sehingga dapat diterima dan ditaati oleh setiap pemangku kepentingan.

Ada beberapa cara yang dapat digunakan untuk mengembangkan kebijakan, dalam penelitian ini pengembangan tersebut dilaksanakan dengan pemodelan atau *modelling*. Mengapa cara *modelling* dipilih dalam penelitian ini? Penelitian mengenai pencemaran, terutama pencemaran udara, bukanlah merupakan penelitian yang mudah dilakukan mengingat data mengenai sumber emisi, jumlah polutan di udara ambien, serta reseptor yang menerima dampak polusi tidak mudah didapat. Seperti masalah pencemaran lingkungan pada umumnya, pencemaran udara baru akan menjadi topik pembicaraan jika sudah ada korban atau kerugian yang parah. Sebelum dirasakan dampak negatifnya, tidak pernah dilakukan pendataan yang kontinyu dan terstruktur terhadap sumber polusi, konsentrasi polutan di udara ambien, maupun reseptornya.

Keterbatasan data pencemaran menyebabkan kajian terhadap masalah pencemaran sampai dengan tahun 1970-an cenderung bersifat empiris. Namun dengan berkembangnya kemampuan komputer di era 1970-an, maka berkembang pula metode *modelling* yang dapat “menirukan” kondisi alam sebenarnya. Akibatnya studi terhadap pencemaran udara dapat dilakukan sebelum masalah pencemaran ini menjadi masalah yang besar. Sebagai contoh Meadows (1972 dalam Robert, 2004) melakukan studi “*Limit*

*to growth*” dengan melakukan analisis mengenai keterbatasan lingkungan melalui metode *modelling*. Secara singkat, metode *modelling* dapat digunakan untuk melakukan studi *ex-ante* terhadap masalah lingkungan. Dalam penelitian ini masalah pencemaran udara, khususnya pencemaran deposisi asam, dikaji dengan metode *modelling*. Penelitian pengembangan model pengendalian ini diharapkan dapat menjadi “*early warning system*”, sebelum dampak negatif deposisi asam menjadi masalah besar dan merugikan berbagai pihak.

Hal penting yang perlu diperhatikan dalam penelitian pengembangan model kebijakan untuk mengendalikan pencemaran deposisi asam di wilayah DKI Jakarta adalah adanya kebutuhan energi yang bersumber dari pembakaran BBF. Pola hidup masyarakat yang adakalanya menggunakan BBF secara berlebihan atau boros berbanding terbalik dengan kekhawatiran akan terjadinya peningkatan polusi deposisi asam. Untuk mengetahui apakah terjadi pemborosan penggunaan energi yang bersumber dari BBF di DKI Jakarta, maka perlu dilakukan analisis untuk mengetahui seberapa besar jumlah optimal BBF yang dapat digunakan agar polusi deposisi asamnya minimal, lalu dibandingkan dengan PDRB.

Pembangunan dengan menggunakan BBF sebagai sumber energi untuk meningkatkan kesejahteraan penduduk DKI Jakarta tidak mungkin dihentikan guna mencegah pencemaran deposisi asam, maka perlu dilakukan estimasi terhadap nilai ekonomi polusi deposisi asam dan prediksi nilai tersebut pada masa yang akan datang. Hasil estimasi tersebut dilengkapi dengan data sosial demografi dapat dijadikan sebagai acuan dalam membuat berbagai kebijakan alternatif pengendalian deposisi asam. Secara singkat penelitian dalam mengembangkan model alternatif kebijakan untuk mengendalikan deposisi asam untuk provinsi DKI Jakarta dapat dilaksanakan atas dasar pertanyaan-pertanyaan berikut:

1. Apakah penggunaan BBF sebagai sumber energi oleh penduduk DKI Jakarta dilakukan dengan boros?
2. Seberapa besar nilai dampak pencemaran emisi gas  $SO_x$  dan  $NO_x$  di masa mendatang yang diakibatkan oleh penggunaan BBF sebagai sumber energi?
3. Bagaimanakah kebijakan alternatif yang akan diterapkan untuk mengendalikan pencemaran deposisi asam di masa mendatang?

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk membangun suatu model kebijakan alternatif guna mengendalikan pencemaran deposisi asam. Pengembangan kebijakan alternatif didasarkan atas adanya dua pilihan yang saling bertentangan yaitu peningkatan pembangunan melalui pembakaran BBF sebagai sumber energi atau mencegah kerusakan lingkungan akibat pencemaran deposisi asam yang ditimbulkan oleh pembakaran BBF. Agar kebijakan alternatif yang dikembangkan dapat memberikan dampak yang optimal terhadap pembangunan sekaligus meminimalkan pencemaran deposisi asam, maka tujuan khusus dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis jumlah optimal BBF yang dapat digunakan sebagai sumber energi bagi penduduk DKI Jakarta dengan memberi dampak pencemaran deposisi asam minimal terhadap lingkungan, untuk mengetahui tingkat pemborosan penggunaan BBF.
2. Mengestimasi nilai ekonomi dari kerusakan yang disebabkan oleh deposisi asam akibat penggunaan BBF sebagai sumber energi dan memprediksi nilai tersebut dimasa yang akan datang.
3. Memformulasikan alternatif-alternatif kebijakan untuk mengendalikan pencemaran deposisi asam.

### **1.4. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini mengambil wilayah DKI Jakarta sebagai areal pengamatan, karena sebagai ibukota negara, selama ini DKI Jakarta menjadi acuan bagi provinsi lainnya di Indonesia. Jika dapat dikembangkan model pengembangan kebijakan untuk mengendalikan pencemaran udara yang dapat berfungsi secara efektif bagi DKI Jakarta, maka proses tersebut dapat diadopsi oleh provinsi lain. Secara lebih spesifik hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa:

- Metode pengembangan model matematik untuk mengestimasi nilai kerusakan yang diakibatkan oleh pencemaran deposisi asam sebagai dampak dari

penggunaan BBF sebagai sumber energi, diharapkan metode ini dapat dijadikan contoh dalam pengembangan model pencemaran lainnya.

- Metode pengembangan formulasi kebijakan untuk mengendalikan pencemaran deposisi asam yang dapat dijadikan acuan untuk mengembangkan kebijakan dalam mengendalikan pencemaran lainnya.

### 1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Deposisi asam yang diamati dalam penelitian ini hanya yang berasal dari emisi gas  $SO_x$  dan  $NO_x$  hasil pembakaran BBF. Yang dimaksud dengan BBF (Bahan Bakar Fossil) adalah bahan bakar yang dihasilkan dari pengolahan minyak bumi dan batubara (PE-UI, 2004). Hasil pengolahan minyak bumi dikenal sebagai BBM (bahan bakar minyak) yang umumnya digunakan sebagai sumber energi dalam transportasi dan kegiatan rumah tangga. Sedangkan batubara lebih banyak digunakan untuk menghasilkan listrik dan sebagai bahan bakar dalam berbagai kegiatan industri. Baik BBM maupun batubara mempunyai berbagai jenis, yang masing-masing memiliki faktor emisi berbeda. Dalam penelitian ini data volume penjualan BBM yang digunakan merupakan data agregat, sehingga emisi dari tiap jenis BBM tidak diperhitungkan. Demikian juga data produksi listrik yang berasal dari berbagai jenis batubara tidak dianalisis faktor emisinya satu per satu.

Lokasi yang dijadikan objek dalam penelitian ini adalah Provinsi Daerah Khusus Ibukota (DKI) Jakarta, kecuali kabupaten Kepulauan Seribu. Provinsi ini terbagi menjadi 5 wilayah, yaitu Kotamadya Jakarta Pusat, Jakarta Utara, Jakarta Timur, Jakarta Selatan, dan Jakarta Barat. Meskipun masing-masing wilayah memiliki sumber emisi dan konsentrasi ambien gas  $SO_x$  dan  $NO_x$  yang berlainan, namun dalam penelitian ini perbedaan emisi maupun konsentrasi ambien dari gas-gas tersebut belum diperhitungkan.

Sifatnya sebagai polusi lintas batas menyebabkan dampak negatif deposisi asam dapat berskala lokal, regional, maupun global. Dalam penelitian ini dampak polusi deposisi asam yang dikaji barulah dampak pada skala lokal. Dampak deposisi asam pada skala regional dan global disarankan sebagai penelitian lanjutan.

Penelitian dalam disertasi ini berlangsung selama 20 bulan, dimulai dari bulan Desember 2005 sampai dengan Juli 2007, dan data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari survei yang dilakukan BPS (Badan Pusat Statistik) serta pengamatan BMG (Badan Meteorologi dan Geofisika) dan BPLHD atau Bapedalda (Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Daerah) serta Badan Pembinaan Keamanan Direktorat Lalu Lintas, Kepolisian Negara Republik Indonesia (Ditlantas Polri) selama 12 tahun. Data sekunder yang diperoleh adalah data tahun 1993 sampai dengan data tahun 2004, namun demikian data tahun 1998 tidak disertakan dalam analisis, karena merupakan data pencilan akibat terjadinya krisis nasional pada saat itu.

Data kendaraan dan penjualan BBM yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data provinsi DKI Jakarta, padahal kendaraan yang melintasi provinsi ini banyak yang berasal dari wilayah sekitarnya, seperti Bodetabek. Sementara itu sifat deposisi asam sebagai *transboundary air pollution* atau polusi lintas batas menyebabkan penggunaan BBM di wilayah Bodetabek, terutama untuk kegiatan industri, juga berpotensi mempengaruhi konsentrasi gas  $SO_x$  dan  $NO_x$  di udara ambien provinsi DKI Jakarta. Kendaraan yang melintasi DKI Jakarta dan BBM yang digunakan oleh industri dari provinsi sekitar DKI Jakarta belum diperhitungkan dalam penelitian ini.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Seperti telah dijelaskan pada bab terdahulu, deposisi asam merupakan polusi yang berdampak sangat luas, dan untuk mereduksi emisinya tidak dapat hanya dengan berbagai peralatan hasil pengembangan teknologi dan metodologi. Polusi deposisi asam terjadi berkaitan dengan upaya setiap manusia untuk meningkatkan kesejahteraannya, karena itu diperlukan kebijakan yang dapat mengubah perilaku manusia guna mengendalikan pencemaran tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan beberapa alternatif kebijakan yang diharapkan dapat berfungsi secara efektif dalam mengendalikan pencemaran deposisi asam di wilayah DKI Jakarta. Tahap awal untuk mencapai tujuan penelitian dilakukan melalui kajian pustaka yang hasilnya dijabarkan pada bab ini. Bab ini akan membahas kondisi permasalahan deposisi asam, hubungan antara polusi deposisi asam dengan tingkat kesejahteraan, konsep pengendalian polusi, dan evaluasi terhadap kebijakan lingkungan yang selama ini berlaku, serta asesmen terhadap kebijakan lingkungan melalui pemodelan.

### 2.1. Kondisi Permasalahan Deposisi Asam

Udara merupakan faktor yang sangat penting bagi kehidupan seluruh makhluk hidup di bumi. Bahkan lebih penting dari air. Jika terdapat sumber air yang tercemar, maka manusia dapat menggunakan sumber air lainnya, sedangkan pada udara yang tercemar tidak dapat dibuat sekat untuk menghindarinya. Tanpa makan dan minum, manusia dapat bertahan hidup beberapa hari. Tanpa udara, manusia hanya dapat bertahan hidup selama beberapa menit (KLH, 2006 dan Colls, 2002). Udara ambien merupakan sumberdaya alam yang sangat mempengaruhi kehidupan manusia serta makhluk hidup lainnya. Karena itu udara ambien harus dijaga dan dipelihara kelestarian fungsinya terutama bagi kesehatan dan kesejahteraan manusia. Sayangnya kualitas udara ambien mudah berubah-ubah sebagai akibat dari adanya polutan. Polusi udara merupakan problem yang serius, sehingga dinyatakan sebagai masalah lingkungan global pada konferensi lingkungan hidup sedunia di Stockholm pada tahun 1972 (Howells, 1995).

Deposisi asam merupakan salah satu polusi udara yang diakibatkan oleh berlebihnya konsentrasi gas  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$  di udara ambien, dan data korban manusia yang diakibatkannya dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Data jumlah korban pencemaran udara di dunia tahun 1873-1966

Lokasi	Tanggal	Polutan	Meninggal
London, Inggris	09-11 Des 1873	$\text{SO}_2$	650
London, Inggris	20-29 Jan 1880	$\text{SO}_2$	1176
Meuse Valley, Belgia	01-05 Des 1930	$\text{SO}_2$	63
Donora, USA	26-31 Okt 1948	$\text{SO}_2$	20
London, Inggris	26-30 Nov 1948	$\text{SO}_2$	700
Poza Rica, Meksiko	24 Nov 1950	$\text{H}_2\text{S}$	22
London, Inggris	05-09 Des 1952	$\text{SO}_2$	4000
London, Inggris	03-06 Juni 1955	$\text{SO}_2$	1000
New York, USA	24-30 Nov 1966	$\text{SO}_2$	168

Diolah dari: Cochran dalam Shah *et al.* (1997) dan Menz dan Seip (2004)

Selain berdampak negatif terhadap manusia, deposisi asam juga berdampak buruk terhadap hewan dan tumbuhan bahkan juga bagi lingkungan abiotik seperti air, tanah, dan udara, serta bangunan. Polusi deposisi asam berpengaruh pada seluruh ekosistem dan mengganggu kesehatan serta kenyamanan yang pada akhirnya berdampak negatif terhadap aspek ekonomi. Secara ringkas dampak negatif deposisi asam diperlihatkan pada Tabel 4. Deposisi asam yang berdampak negatif terhadap ekosistem perairan (akuatik) maupun daratan (terrestrial) dan pada berbagai reseptor tentunya diketahui melalui serangkaian penelitian. Penelitian mengenai deposisi asam telah dimulai sejak tahun 1850-an (Howells, 1995).

Tabel 4 Dampak negatif deposisi asam

Ekosistem	Reseptor	Dampak Pada Ekosistem	Dampak Pada Reseptor
Akuatik (perairan)	Tanaman dan hewan	Konsentrasi ion-ion $H^+$ , $Cl^-$ , $Na^+$ berubah	Terjadi perubahan tekanan osmosa tanaman dan hewan dalam air
	Organisme	Konsentrasi logam Hg, Zn, Al berubah	Adanya gangguan pertukaran gas pada insang
	Tanaman	Pembentukan senyawa kompleks Al dan P	Pembentukan biomasa terganggu
Terrestrial (daratan)	Perairan	Peningkatan sifat steril dari perairan	Terjadi pengikatan debris oleh senyawa kompleks logam, yang mengubah proses dekomposisi
	Tanaman	Peningkatan konsentrasi ion $H^+$	Adanya efek “bleaching” terhadap klorofil, sehingga menurunkan kecepatan fotosintesis
	Manusia dan hewan	Udara tercemar gas $SO_x$	Gas $SO_x$ dapat mengganggu sistem pernafasan
	Manusia dan hewan	Udara tercemar gas $NO_x$	Paru-paru akan mengalami pembengkakan. Pada konsentrasi $NO_2 > 100$ ppm kebanyakan hewan akan mati
	Abiotik	Asam meningkatkan kecepatan korosi, porositas dan merusak cat	Asam merusak bangunan dari logam, kapur dan cat

Diolah dari: Baum, 2001; Burtraw *et al.*, 1997; Darmono, 2001; Duchesne *et al.*, 2002; Effendi, 2003; Fardiaz, 1992; Howells, 1995; Kennedy, 1992; Lal *et al.*, 1998; Menz dan Seip, 2004; Sawir, 1997; Tietenberg, 1998; dan US-EPA, 2002.

Telah banyak penelitian mengenai dampak negatif deposisi asam, baik terhadap manusia, hewan maupun tumbuhan, bahkan terhadap lingkungan abiotik. Hasil penelitian tersebut antara lain adalah:

1. Dampak negatif deposisi asam terhadap kesehatan manusia memiliki nilai ekonomi yang jauh lebih besar dibandingkan dampaknya terhadap lingkungan biotik maupun abiotik dibuktikan oleh studi yang dilakukan oleh Burtraw *et al.* (1997). Studi ini juga menggambarkan bahwa biaya yang dikeluarkan

untuk mereduksi jumlah emisi gas SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> nilainya lebih kecil dibandingkan dengan dampak negatif yang akan ditimbulkannya.

2. Deposisi asam berdampak negatif terhadap kesehatan dibuktikan oleh studi yang dilakukan oleh Olsthoorn *et al.* (1999) tentang *costs and benefits* dari standar kualitas udara yang diusulkan Uni Eropa untuk polusi SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan PM<sub>10</sub> yang akan diterapkan pada tahun 2010. PM<sub>10</sub> (*Particulate Matters 10*) adalah partikel-partikel kecil di udara yang mempunyai diameter lebih kecil dari 10 $\mu$  (sepuluh mikron atau 10<sup>-6</sup> meter). Dalam penelitian ini ditemukan adanya pembentukan *secondary* PM<sub>10</sub> yang berasal dari gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>.
3. Sifat deposisi asam yang merupakan *transboundary air pollution* dinyatakan oleh para ilmuwan AS dan Kanada pada tahun 1970-an yang menemukan adanya deposisi asam di seluruh wilayah AS bagian timur, Kanada bagian tenggara, dan beberapa wilayah di Kanada bagian barat. Setelah dipelajari selama hampir 10 tahun, diketahui bahwa sumber pencemaran gas SO<sub>2</sub> ada di Mississippi bagian hulu dan lembah Ohio. Kedua daerah itu merupakan tempat yang banyak pembangkit tenaga listrik tenaga uap yang dihasilkan melalui pembakaran batubara yang merupakan salah satu BBF (Akhadi, 1999).
4. Bukti lain dari polusi deposisi asam yang bersifat *transboundary air pollution* diperoleh dari penelitian yang dilakukan oleh Ohizumi *et al.* (2001) di Niigata, Jepang, yang menyatakan bahwa deposisi asam di Jepang merupakan akibat dari pembakaran batubara sebagai sumber energi di Cina. Penelitian ini memperkuat hasil penelitian sebelumnya oleh Nakada dan Pearce (1998) yang menyatakan deposisi asam sebagai 'eksternalitas internasional' karena Jepang merupakan negara *net importer* deposisi asam yang berasal dari Cina dan Korea Selatan.
5. Dampak negatif deposisi asam terhadap lingkungan biotik dan abiotik dibuktikan oleh Dawei *et al.* (2001) yang melakukan penelitian di Tie Shan Ping, Chongqing (Cina), dan hasilnya menyatakan adanya efek negatif deposisi asam terhadap tanah dan air sehingga terjadi kerusakan hutan.
6. Dampak negatif deposisi asam terhadap tumbuhan dibuktikan oleh Duchesne *et al.* (2002) yang meneliti pengaruh hujan asam pada tanaman maple sebagai

penghasil gula di Kanada. Hasil penelitiannya menyatakan bahwa sejak tahun 1960 sampai dengan tahun 2000 telah terjadi penurunan kecepatan pertumbuhan tanaman maple sebesar 17% akibat adanya deposisi asam.

7. Penelitian Syahril *et al.* (2002) tentang kualitas udara di Jakarta menyatakan bahwa dampak negatif gas SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> terhadap kesehatan tidak sebesar PM<sub>10</sub>. Namun demikian penelitian Olsthoorn *et al.* (1999) telah membuktikan bahwa ternyata sebagian dari PM<sub>10</sub> juga berasal dari gas SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub>.

Penelitian-penelitian mengenai deposisi asam saat ini sudah pada tahap penghitungan nilai ekonomi dari kerusakan lingkungan yang diakibatkannya dan biaya yang harus dikeluarkan untuk mereduksi emisi gas-gas penyebab deposisi asam. Penelitian seperti ini antara lain dilakukan oleh Burtraw *et al.* (1997) dan Olsthoorn *et al.* (1999). Diharapkan dengan mengetahui besarnya nilai ekonomi yang harus dikeluarkan untuk mengatasi polusi deposisi asam, maka masyarakat akan lebih peduli terhadap polusi ini serta berusaha untuk mereduksi emisi gas-gas yang menyebabkannya.

Dari penjelasan di atas maupun pada sub-bab perumusan masalah, terlihat bahwa telah banyak penelitian yang dilakukan baik secara eksperimental, monitoring, maupun pemodelan tentang pencemaran deposisi asam. Lalu dimana posisi penelitian ini? Tabel 5 memperlihatkan analisis terhadap penelitian-penelitian yang selama ini sudah dilaksanakan dan apa perbedaannya dengan penelitian ini. Penelitian ini berusaha untuk mengembangkan kebijakan alternatif dalam mengelola pencemaran deposisi asam, karena meskipun telah begitu banyak studi yang dilakukan untuk mengatasi pencemaran deposisi asam ternyata pencemaran ini masih menjadi masalah lingkungan global.

Tabel 5 Analisis terhadap penelitian-penelitian mengenai deposisi asam

Tujuan dan cara	Peneliti (tahun)	Skala	Hasil	Variabel dan instrumen
Monitoring adanya hujan asam dengan cara pengamatan, eksperimen dan simulasi di kota:		Mikro regional		
- Bogor	- Husin <i>et al.</i> (1991)		- Tingkat hujan asam di Bogor tidak signifikan secara statistik	- Tingkat keasaman air hujan
- Jakarta	- Hamonangan <i>et al.</i> (2003)		- Konsentrasi gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> di Jakarta dipengaruhi oleh lokasi pabrik dan kepadatan lalu lintas	- Pola dispersi gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub>
Membuktikan adanya sifat deposisi asam sebagai <i>transboundary air pollution</i> melalui monitoring, eksperimen, dan pemodelan di:		Global makro		
- Jepang, Cina, Korea Selatan	- Nakada dan Pearce (1998)		- Jepang merupakan negara <i>net importer</i> deposisi asam yang berasal dari Cina dan Korea Selatan	- Pola distribusi dan biaya kerusakan yang ditimbulkan deposisi asam
- Niigata, Jepang	- Ohizumi <i>et al.</i> (2001)		- Hujan asam di Niigata, Jepang terjadi karena pembakaran BBF di Cina	- Pola distribusi deposisi asam
Membuktikan dampak negatif deposisi asam pada ekosistem air dan tanah di Chongqing, Cina melalui monitoring dan eksperimen	Dawei <i>et al.</i> (2001)	Mikro regional	Terjadi kerusakan hutan di Chongqing (Cina) karena deposisi asam	Dampak deposisi asam terhadap air dan tanah

Tabel 5 (Lanjutan)

Tujuan dan cara	Peneliti (tahun)	Skala	Hasil	Variabel dan Instrumen
Menghitung <i>cost and benefit</i> dari reduksi deposisi asam dengan cara pemodelan di:		Global makro		
- Amerika	- Burtraw <i>et al.</i> (1997)		- Biaya untuk mengurangi emisi SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> jauh lebih kecil dibandingkan biaya untuk memperbaiki dampaknya	- <i>cost and benefit</i> dari reduksi deposisi asam
- Eropa	- Olsthoorn <i>et al.</i> (1999)		- Deposisi asam berdampak negatif terhadap kesehatan, adanya konversi gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> menjadi <i>secondary</i> PM <sub>10</sub> di atmosfer	- Valuasi ekonomi dampak kesehatan (kematian) menggunakan <i>Value of a Statistical Life</i> (VOSL)
Mengembangkan alternatif kebijakan untuk mengelola pencemaran deposisi asam melalui analisis pemodelan	<b>Penelitian ini</b> (2005-2007)	Prediksi dan prototipe	Alternatif kebijakan yang efektif untuk mengelola pencemaran deposisi asam	Pengelolaan deposisi asam, dengan memperhitungkan variabel: lingkungan ekonomi dan sosial (termasuk kebijakan)

Mengapa deposisi asam merupakan salah satu masalah lingkungan yang bersifat global? Gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> sebagai penyebab terjadinya deposisi asam dapat diemisikan dari suatu areal pembakaran BBF ataupun kegiatan antropogenik lainnya. Angin dapat membawa gas-gas ini sampai melewati batas administrasi areal sumber emisinya, kemudian jatuh ke permukaan bumi berupa deposisi asam pada daerah yang cukup jauh dari areal tersebut. Bahkan pembakaran BBF di suatu negara dapat menimbulkan deposisi asam di negara lain, akibatnya polusi deposisi asam disebut sebagai polusi udara lintas batas (*transboundary air pollution*).

Sifatnya sebagai polusi udara lintas batas menyebabkan dampak deposisi asam dapat berskala lokal (mikro), regional (meso), dan global (makro). Menurut Soedomo (2001) pencemaran udara skala lokal adalah pencemaran dengan orde jangkauan sampai satuan kilometer, dan skala waktu dalam orde detik sampai beberapa menit. Pencemaran berskala regional memiliki orde jangkauan sampai dengan seratus kilometer, dan skala waktu dalam orde menit sampai beberapa jam atau satu hari. Sedangkan pencemaran skala global merupakan pencemaran berorde jangkauan di atas seratus kilometer dengan skala waktu lebih lama dari satu hari. Luasnya cakupan pencemaran deposisi asam menyebabkan deposisi asam menjadi salah satu isu lingkungan global. Selain menjadi masalah lingkungan global, ternyata deposisi asam juga sangat mempengaruhi tingkat kesejahteraan seperti dijelaskan pada sub-bab berikut.

## 2.2. Deposisi Asam dan Kesejahteraan

Pencemaran deposisi asam diawali dengan adanya kenaikan jumlah penduduk dan penggunaan energi selaras dengan adanya upaya peningkatan kesejahteraan melalui pembangunan. Dilain pihak, meningkatnya pembangunan ternyata telah mengakibatkan terjadinya degradasi lingkungan, dan dalam perspektif biofisik degradasi lingkungan disebabkan oleh (Suparmoko dan Suparmoko, 2000 serta Spash dan McNally, 2001):

1. berkurangnya jumlah sumberdaya yang dapat disediakan oleh lingkungan,
2. kemampuan lingkungan untuk mengolah polusi berkurang, karena polusi yang dihasilkan melebihi kemampuan penyangga (*buffer*) lingkungan,
3. kemampuan lingkungan untuk menyediakan *non-used value* berkurang, karena sudah diubah fungsinya atau disebabkan meningkatnya polusi.

Sedangkan menurut Fauzi (2004) menurunnya fungsi atau degradasi lingkungan dalam perspektif ekonomi secara umum disebabkan oleh:

1. sifat sumberdaya alam sebagai barang publik sehingga terjadi konsumsi yang berlebihan,
2. adanya eksternalitas,
3. sulitnya menentukan hak kepemilikan (*property right*).

Fauzi dan Anna (2005) menyatakan laju degradasi sumberdaya alam yang terbarukan dapat dinyatakan dengan persamaan matematik berikut:

$$\mu = 1 / \left( 1 + e^{\frac{\text{hat}}{\text{hst}}} \right) \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana:

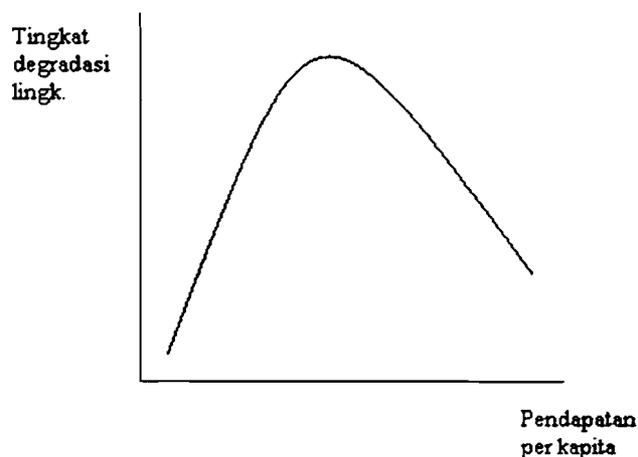
- $\mu$  = laju degradasi
- $\text{hat}$  = produksi aktual (pada pencemaran udara = emisi sebenarnya/ambien) pada periode t
- $\text{hst}$  = produksi lestari (pada pencemaran udara = baku mutu ambien = BMA) pada periode t

Pada kasus pencemaran deposisi asam, menurunnya fungsi lingkungan lebih disebabkan oleh adanya eksternalitas baik pada tingkat lokal maupun global. Eksternalitas merupakan keuntungan atau kerugian yang diakibatkan oleh transaksi ekonomi dari satu pihak yang mengakibatkan dampak kepada pihak ketiga, dan pihak pelaku aktivitas tidak menyediakan kompensasi terhadap pihak yang menerima dampak eksternalitas (McTaggart *et al.*, 1996; Fauzi, 2004).

Menurut Narada dan Pearce (1998) deposisi asam merupakan polusi sebagai akibat dari adanya eksternalitas pada aktivitas ekonomi. Eksternalitas internasional terutama disebabkan oleh kurangnya hak kepemilikan (*property right*) yang relevan. Tidak ada hak kepemilikan terhadap atmosfer menyebabkan setiap negara bebas untuk mempolusi atmosfer untuk meminimalkan biaya sosial mereka. Sementara itu kerusakan lingkungan terjadi di negara tetangganya, sehingga secara global eksternalitas akibat deposisi asam akan mempengaruhi tingkat kesejahteraan.

Adanya hubungan antara tingkat kesejahteraan dengan kualitas udara dibuktikan oleh penelitian yang dilakukan oleh Bartz dan Kelly (2004); Stern (2004); Susandi (2004); Hung dan Shaw (2005); yang menyimpulkan bahwa kesejahteraan mempengaruhi degradasi lingkungan dengan pola seperti yang diperlihatkan oleh kurva lingkungan Kuznet (*Environmental Kuznets Curve* atau EKC). Kurva ini menggambarkan hubungan antara pertumbuhan ekonomi yang diukur dengan pendapatan per kapita

terhadap tingkat degradasi lingkungan akan menghasilkan kurva dengan bentuk U terbalik (*Inverted U Curve*) seperti terlihat pada gambar berikut.



Gambar 1 Kurva lingkungan Kuznet

Sumber: diadopsi dari Hung dan Shaw (2005), Susandi (2004)

EKC memperlihatkan bahwa degradasi lingkungan akan meningkat dengan meningkatnya pendapatan per kapita, namun setelah mencapai titik tertentu degradasi lingkungan akan menurun meskipun pendapatan naik. Menurut Susandi (2004) hubungan antara emisi per kapita dengan *real* GDP per kapita dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$m_t = \beta_0 + \beta_1 y_t + \beta_2 y_t^2 + \varepsilon_t \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana:

$m$  = emisi per kapita

$y$  = *real* GDP per kapita

$t$  = waktu

$\varepsilon$  = *error* (gangguan)

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$  = parameter regresi dari EKC, nilainya spesifik untuk tiap jenis polutan seperti terlihat pada tabel berikut.

Tabel 6 Estimasi hasil EKC dari penelitian Susandi (2004)

Parameter	Sulfur dioksida	Nitrogen oksida
$\beta_0$	-148,4100	-54,8320
$\beta_1$	201,2600	73,5240
$\beta_2$	-9,4216	-1,4796

Dalam kasus pencemaran deposisi asam, tingkat degradasi lingkungan pada EKC dinyatakan sebagai emisi per kapita gas  $SO_x$  dan  $NO_x$  dan tingkat kesejahteraan dinyatakan dengan *real* GDP per kapita, sehingga degradasi lingkungan karena deposisi asam dapat dijadikan sebagai petunjuk tingkat kesejahteraan atau pembangunan di suatu wilayah. Pendapat Susandi (2004) ini berseberangan dengan Boulding (dalam Fauzi, 2007) yang menyatakan GDP bukanlah merupakan ukuran keberhasilan suatu pembangunan, jika sumberdaya alam yang menjadi modal peningkatan GDP justru mengalami degradasi akibat pembangunan yang tidak bertanggung jawab.

Menurut Fauzi (2007) hal yang perlu diperhatikan dalam mempelajari hubungan antara degradasi lingkungan dengan pendapatan penduduk adalah adanya *hysteresis*. *Hysteresis* merupakan keadaan dimana sistem sumberdaya alam mengalami keterkaitan dengan masa lalu (*path dependency*). Untuk mengetahui keadaan lingkungan dalam kaitannya dengan kegiatan ekonomi di masa yang lalu bukanlah merupakan hal mudah, karena selama ini aspek lingkungan dan ekonomi merupakan 2 hal yang terpisah. Namun dengan adanya berbagai bukti mengenai keterkaitan yang erat antara kondisi lingkungan dan kegiatan ekonomi, maka *hysteresis* merupakan fenomena yang mau tidak mau harus diamati.

Fauzi (2007) menyatakan bahwa EKC hanya berlaku jika sumberdaya alam yang digunakan bersifat dapat terbarukan (*reversible*), karena sumberdaya alam *irreversible* akan sulit sekali disubstitusi oleh modal manusia ataupun modal alam lainnya. Lebih lanjut Fauzi (2007) mengatakan bahwa EKC hanya dapat mendeteksi polutan yang bergerak (*mobile pollutant*), artinya jika emisi menurun maka stok, yang dalam kasus polusi deposisi asam berupa konsentrasi ambien gas  $SO_2$  dan  $NO_2$ , juga menurun. Selain kedua batasan tersebut, konsep EKC banyak menuai kritik dan bantahan seperti yang dikemukakan dalam artikel yang ditulis oleh Stern (2004). Meskipun demikian EKC merupakan konsep awal yang menjabarkan hubungan antara degradasi lingkungan

terhadap tingkat kesejahteraan, karena itu setiap pembahasan mengenai kedua hal ini EKC selalu menjadi acuan.

Untuk mengatasi degradasi lingkungan yang disebabkan oleh polusi udara, Spash dan McNally (2001) secara lebih spesifik menyarankan langkah-langkah yang dapat diambil untuk mengatasinya, yaitu dengan:

1. Membuat model dispersi: untuk memperkirakan bagaimana faktor-faktor meteorologi dan perubahan emisi polutan mempengaruhi konsentrasinya di atmosfer.
2. Menghitung bagaimana perubahan konsentrasi polutan di atmosfer akan mempengaruhi deposisi dan konsentrasinya terhadap *recipient* seperti tanah dan air.
3. Menggunakan fungsi *dose-response* untuk menghitung dampak dari emisi polutan terhadap ekosistem atau reseptor, karena adanya perubahan konsentrasi polutan.
4. Mengestimasi kerusakan dengan menghitung nilai ekonomi dari dampak emisi polutan, dengan memperhitungkan faktor-faktor *uncertainties* agar dapat dilakukan *recovery* terhadap lingkungan yang rusak dan memprediksi biaya abatement yang diperlukan.

Dalam penelitian ini tidak dilakukan langkah pertama berupa pembuatan model dispersi, yang bertujuan untuk mengetahui konsentrasi polutan di atmosfer. Karena telah ada data mengenai konsentrasi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di udara ambien DKI Jakarta, yang pengukurannya dilakukan oleh BPLHD atau Bapedalda (Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Daerah) Jakarta dan Badan Meteorologi dan Geofisika (BMG). Selain itu, pengembangan model dispersi merupakan suatu pekerjaan besar dan sudah banyak penelitian-penelitian mengenai dispersi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di Jakarta. Penelitian tersebut antara lain telah dilakukan oleh Syahril *et al.* (2002) dan Hamonangan *et al.* (2003). Model dispersi yang digunakan oleh Syahril *et al.* (2002) untuk menghitung kualitas udara ambien dari sumber emisi bergerak menggunakan persamaan model box Eulerian berikut:

$$C_T = a \frac{E}{Q} + \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} C_{Ti} \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana:

- a = persentase angin yang tidak kencang (< 1 m/s)
- E = emisi total per grid parameter
- Q = kecepatan udara berdasarkan angin dan daerah interaksi dari tiap arah
- C<sub>T</sub> = konsentrasi total
- i = jumlah arah angin

Sedangkan model dispersi untuk menghitung konsentrasi polutan dari sumber tidak bergerak yang dilakukan oleh Hamonangan *et al.* (2003) menggunakan model dispersi Gauss (*Gaussian dispersion model*) berikut:

$$c = \frac{Q_p}{\pi \sigma_y \sigma_z \mu} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2}\right) \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana:

- c = konsentrasi polutan
- Q<sub>p</sub> = kecepatan emisi
- H<sub>e</sub> = tinggi cerobong efektif
- μ = kecepatan angin
- σ<sub>y</sub> = koefisien dispersi pada arah horizontal
- σ<sub>z</sub> = koefisien dispersi pada arah vertikal

Kecepatan emisi (Q<sub>p</sub>) dapat ditentukan berdasarkan nilai Faktor Emisi (*emission factor* = EF) dengan menggunakan rumus berikut (US-EPA, 2006):

$$Q_p = EF \times A \times (1 - ER/100) \dots\dots\dots (2.5)$$

dimana:

- Q<sub>p</sub> = kecepatan emisi (*emission rate*), yaitu jumlah polutan yang diemisikan per satuan waktu
- EF = faktor emisi (*emission factor*)
- A = intensitas kegiatan per satuan waktu (*rate of activity*)

ER = efisiensi pengurangan polutan dari sistem pengendali emisi yang digunakan (*emission reduction efficiency*) dinyatakan dalam persen

Menurut Olsthoorn *et al.* (1999) ada hal yang rumit dalam emisi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>, karena di atmosfer gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> akan dikonversi menjadi partikel sulfat dan ammonium nitrat (yang disebut *secondary* PM<sub>10</sub>). Selama ini PM<sub>10</sub> cenderung dianggap merupakan polutan yang jauh lebih berbahaya daripada SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>, kenyataannya kedua polutan ini berkontribusi pada konsentrasi PM<sub>10</sub>. Relasi antara konsentrasi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> dan konsentrasi sulfat dan (ammonium) nitrat yang merupakan bagian dari senyawa *secondary* PM<sub>10</sub> dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\begin{array}{lll} [\text{Sulfat}] & = 0,073 * [\text{SO}_2]^{0,57} & R^2 = 0,86 \\ [\text{Amonium nitrat}] & = 0,377 * [\text{NO}_2]^{0,63} & R^2 = 0,89 \end{array} \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana:

$$\begin{array}{ll} [\text{Sulfat}] & = \text{konsentrasi sulfat } (\mu\text{g.m}^{-3}) \\ [\text{SO}_2] & = \text{konsentrasi SO}_2 (\mu\text{g.m}^{-3}) \\ [\text{Amonium nitrat}] & = \text{konsentrasi amonium } (\mu\text{g.m}^{-3}) \\ [\text{NO}_2] & = \text{konsentrasi NO}_2 (\mu\text{g.m}^{-3}) \end{array}$$

Studi yang dilakukan oleh Lvovsky *et al.* (2000) mendukung hal ini. Lvovsky menyatakan bahwa emisi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> berkontribusi pada konsentrasi ambien dari PM<sub>10</sub>, karena membentuk *secondary* sulfat dan nitrat. Pengukuran secara empiris menunjukkan bahwa proporsi dari PM<sub>10</sub> yang terbentuk dari sulfat dan nitrat besarnya 10 sampai 50% untuk sulfat dan 10 sampai 40% untuk nitrat.

Seperti dinyatakan oleh Spash dan McNally (2001) di atas, salah satu usaha untuk mengatasi degradasi lingkungan akibat pencemaran udara adalah dengan menghitung dampak perubahan deposisi polutan (dalam penelitian ini polutan yang diamati adalah gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>) terhadap ekosistem melalui fungsi *dose-response*. Susandi (2004) memberikan persamaan fungsi *dose-response* sebagai berikut:

$$dH_i = b_i * P_i * dA \dots\dots\dots (2.7)$$

dimana:

- dHi = perubahan jumlah penduduk yang kontak dengan efek kesehatan i atau jumlah kasus untuk masalah kesehatan i  
 bi = derajat kemiringan fungsi dose-respons  
 Pi = populasi yang beresiko terkena masalah kesehatan i  
 dA = perubahan konsentrasi ambien dari polusi udara di atas kualitas udara yang ditetapkan oleh WHO

Lebih jauh lagi studi yang dilakukan oleh Ostro (1994) dan Susandi (2004) menyatakan bahwa berbagai jenis gangguan kesehatan yang diakibatkan oleh kedua polutan tersebut mengikuti persamaan matematik berikut:

1. Kasus kesehatan akibat polusi gas SO<sub>2</sub> di udara ambien:

a. Mortalitas prematur:

$$NP(t) = 0,048 * \left[ \frac{SO_2(t) - SO_{2st}}{SO_{2st}} \right] * P(t) * CM(t) \text{ untuk } SO_2(t) > SO_{2st} \dots\dots\dots (2.8)$$

dimana:

- NP(t) : jumlah penduduk yang meninggal akibat polusi gas SO<sub>2</sub> pada tahun ke-t  
 SO<sub>2</sub>(t) : konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) pada tahun ke-t  
 SO<sub>2st</sub> : baku mutu ambien (BMA) konsentrasi SO<sub>2</sub> per tahun  
 P(t) : jumlah populasi pada tahun ke-t  
 CM(t) : laju mortalitas kasar Indonesia pada tahun ke-t

b. Penyakit pernafasan (*LRI = lower respiratory illnesses*) pada anak:

$$NLRI(t) = 0,00018 * \left[ \frac{SO_2(t) - SO_{2st}}{SO_{2st}} \right] * PrC(t) * P(t) \text{ untuk } SO_2(t) > SO_{2st} \dots\dots\dots (2.9)$$

dimana:

- NLRI(t) : jumlah penderita LRI pada tahun ke-t  
 PrC(t) : persentase anak-anak yang berusia dibawah 14 tahun di Indonesia, yang pada tahun 2000 = 35,7%

c. Sesak nafas pada orang dewasa (*CDA = chest discomfort among adults*):

$$NCDA(t) = 0,010 * \left[ \frac{SO_2(t) - SO_{2st}}{SO_{2st}} \right] * Pr A(t) * P(t) \text{ untuk } SO_2(t) > SO_{2st} \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana:

NCDA(t): jumlah penderita CDA pada tahun ke-t

PrA(t) : persentase orang dewasa di Indonesia pada tahun t = 100% - PrC(t)

2. Kasus kesehatan akibat polusi gas  $NO_x$  di udara ambien, berupa gangguan pernafasan (*RSD = respiratory symptoms disease*):

$$NRSD(t) = 10,22 * \left[ \frac{NO_2(t) - NO_{2st}}{NO_{2st}} \right] * Pr A(t) * P(t) * 1877,55 \text{ untuk } NO_2(t) > NO_{2st} \dots\dots (2.11)$$

dimana:

NRSD(t) : jumlah penderita RSD pada tahun ke-t

$NO_2(t)$  : konsentrasi gas  $NO_2$  ( $\mu g/m^3$ ) pada tahun ke-t

$NO_{2st}$  : baku mutu ambien (BMA) konsentrasi  $NO_2$  per tahun

1877,55 : faktor konversi konsentrasi  $NO_2$  dari ppm ke  $\mu g/m^3$

Sedangkan hubungan antara fungsi *dose-response* dengan perkiraan nilai kerusakan lingkungan yang diakibatkan oleh emisi polutan dinyatakan oleh Susandi (2004) sebagai fungsi dampak ekonomi sebagai berikut:

$$TC_i = V_i * dH_i \dots\dots\dots (2.12)$$

dimana:

$TC_i$  = total nilai ekonomi dari problem kesehatan i

$V_i$  = nilai problem kesehatan i per unit kasus

$dH_i$  = perubahan jumlah kasus untuk problem kesehatan i

Persamaan di atas menunjukkan nilai ekonomi dari problem kesehatan yang diakibatkan dari pencemaran. Selain berdampak negatif terhadap kesehatan, deposisi asam juga

meningkatkan kecepatan korosi. Dalam kasus pencemaran deposisi asam Lvovsky *et al.* (2000) memberikan persamaan kerusakan material akibat korosi sebagai berikut:

$$\Delta AC = UC \times SAR \times \left( \frac{1}{L_0} - \frac{1}{L_1} \right) \dots\dots\dots (2.13)$$

dimana:

$\Delta AC$  = perubahan biaya tahunan

UC = satuan biaya penggantian material

SAR = stok material yang beresiko terkena dampak deposisi asam

$L_0$  = konsentrasi polusi awal

$L_1$  = konsentrasi polusi baru

Dua persamaan di atas menyatakan adanya masalah kesehatan dan kerusakan bangunan yang ditimbulkan oleh deposisi asam. Sebenarnya kerusakan akibat deposisi asam tidak hanya terhadap kesehatan maupun bangunan, tabel di bawah ini memperlihatkan biaya yang harus dikeluarkan akibat adanya emisi gas SO<sub>2</sub> sebagai penyebab deposisi asam.

Tabel 7 Satuan biaya kerusakan yang ditimbulkan tiap ton emisi SO<sub>2</sub>

Jenis kerusakan	Biaya kerusakan (\$)
Kesehatan	7.500
Bangunan	838
Tanaman	88
Hutan	6
Air	1,2

Sumber: Nakada dan Pearce (1998)

Keterangan tabel:

- Kesehatan manusia: diestimasi berdasarkan VOSL (*value of statistical life*), biaya kesehatan (*medical expenses*), nilai hari tidak masuk kerja, dan WTP (*willingness to pay*) untuk menghindari adanya simptom pernafasan. VOSL yang diestimasi meliputi *averting behaviour*, harga hedonik dan CVM (*contingent valuation method*). Biaya kesehatan dihitung melalui nilai pasar. Nilai hari tidak masuk kerja didasarkan pada nilai pasar dari hari kerja.

- Bangunan: biaya untuk memperbaiki dan memelihara bangunan yang rusak dan material yang diperlukan dihitung sebagai biaya kerusakan bangunan.
- Tanaman: biaya kerusakan akibat polusi deposisi asam diestimasi menggunakan nilai pasar dari produksi tanaman yang berkurang pada harga pasar internasional.
- Hutan: biaya kerusakan hutan diestimasi berdasarkan nilai pasar dari pertumbuhan kayu yang hilang pada harga Inggris.
- Air: biaya pembersihan dari asidifikasi (peningkatan kadar keasaman) dihitung, tetapi reduksi dari produksi ikan dan nilai rekreasi diabaikan.

Biaya kerusakan ini harus diperhitungkan dalam mengestimasi nilai ekonomi dari adanya polusi deposisi asam dalam bentuk *present value net benefit* (PVnetben), yang merupakan nilai sekarang dari manfaat bersih yang diperoleh. Persamaan matematik dari PVnetben menurut Callan dan Thomas (2000) adalah:

$$PVnetben = \sum_{t=1}^n [(b_t - c_t) / (1+r)^t] \dots\dots\dots (2.14)$$

dimana:

- b = *benefit* (manfaat)
- c = *cost* (biaya)
- t = waktu
- r = *discount rate*

Mengingat luasnya dampak polusi deposisi asam dan polusi ini sangat berpengaruh terhadap kesejahteraan masyarakat, maka perlu adanya konsep pengendalian pencemaran yang jelas.

### 2.3. Konsep Pengendalian Lingkungan

Seperti telah diterangkan sebelumnya, pada kasus pencemaran deposisi asam terjadinya degradasi lingkungan lebih disebabkan oleh eksternalitas baik pada skala lokal, regional maupun global. Untuk mencegah adanya eksternalitas negatif, pemerintah dapat melakukan intervensi dalam bentuk kebijakan yang dapat digunakan untuk memaksa, melarang atau mengatur perilaku pihak pembuat eksternalitas. Kebijakan yang ditetapkan pemerintah secara umum berfungsi untuk memperjelas hak kepemilikan dan internalisasi: dalam arti hal yang menyebabkan eksternalitas dijadikan sebagai bagian dari pengambilan keputusan (Fauzi, 2004).

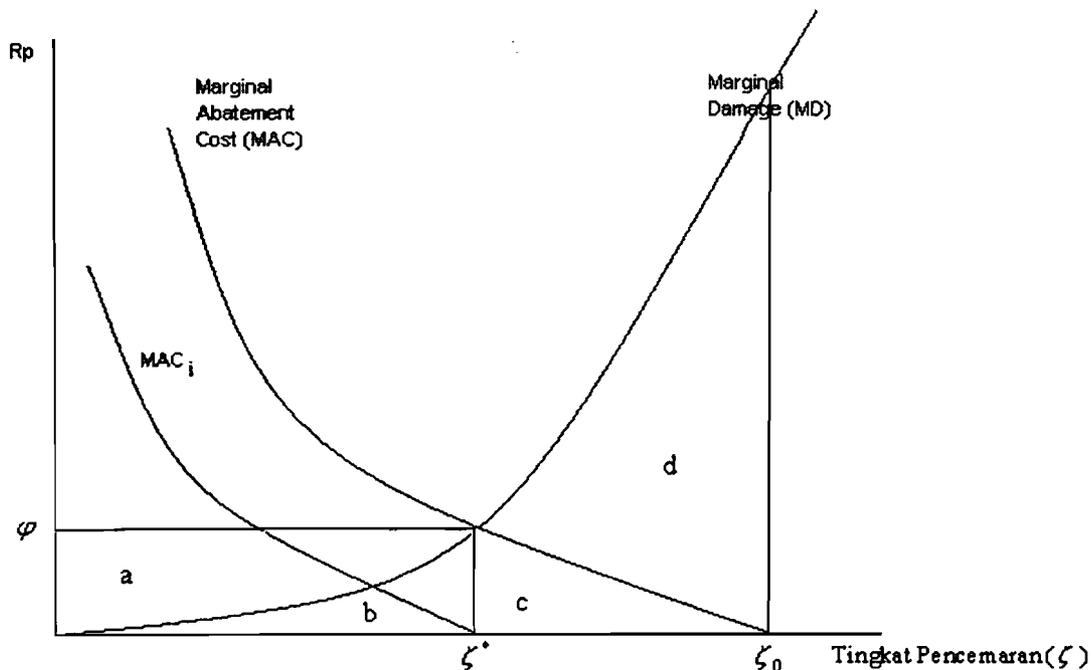
Intervensi pemerintah sangat diperlukan untuk mengatasi eksternalitas, karena pemerintah memiliki sarana hukum untuk memperbaikinya. Meskipun demikian, ada 2 hal penting yang harus diperhatikan dalam intervensi pemerintah, yaitu biaya dan ketidaksempurnaan intervensi. Biaya intervensi pemerintah cukup mahal, karena itu tidak setiap eksternalitas bermanfaat untuk diperbaiki dengan campur tangan pemerintah, terutama jika biayanya lebih besar dari manfaat yang akan diperoleh. Ketidaksempurnaan intervensi pemerintah antara lain disebabkan oleh tinjauan ke depan yang tidak sempurna, dimana para pembuat keputusan mungkin tidak memiliki pengetahuan yang cukup untuk menetapkan standar. Meskipun intervensi pemerintah bersifat tidak sempurna, tetapi dalam hal mengatur barang publik sebaiknya pemerintah melakukan intervensi. Dalam upaya untuk mengatasi pencemaran deposisi asam pemerintah sebaiknya melakukan intervensi untuk mengatur barang publik yang berupa udara.

Sebenarnya pencemaran merupakan fenomena yang bersifat akan tetap ada (*pervasive*) sebagai akibat dari proses aktifitas ekonomi. Dalam prinsip ekonomi sumberdaya alam, berlaku langkah yang terbaik dalam menangani pencemaran adalah bagaimana mengendalikan pencemaran ke tingkat yang paling efisien. Efisiensi yang dimaksud adalah yang bersifat *Pareto improvement*, dimana tidak ada pihak yang memperoleh keuntungan dari pencemaran tersebut.

Salah satu masalah yang timbul pada pengendalian pencemaran melalui pendekatan efisiensi adalah sulitnya bagi pembuat kebijakan untuk menentukan tingkat pencemaran yang optimal. Pemerintah sebagai penentu kebijakan tidak terlalu

berkepentingan untuk menentukan fungsi produksi dan fungsi biaya dari industri. Jika pengendalian pencemaran diserahkan kepada pihak industri semata, maka tidak dapat dijamin tercapainya efisiensi tersebut. Karena itu perlu dilakukan suatu pendekatan pengendalian pencemaran melalui instrumen-instrumen. Menurut Soemarwoto (2004) instrumen tersebut dapat berbasis pasar (*economic instrument* = EI) atau berupa perintah dan kendalikan (*command and control* = CAC) ataupun secara persuasif berupa atur diri sendiri (*do it yourself* = DIY). Instrumen yang berbasis pasar dapat berupa denda (*charge*), pajak (*tax*), atau ijin mencemari (*permit*).

Untuk memahami mekanisme yang efisien dalam menangani masalah pencemaran perhatikan Gambar 2 dan penjelasannya.



Gambar 2 Grafik tingkat pencemaran yang efisien

Sumber: Fauzi (2004)

Istilah MAC (*marginal abatement cost*) menggambarkan biaya pengurangan pencemaran. Suatu industri yang mengeluarkan polusi atau pencemaran dapat mengurangi jumlah pencemar melalui teknologi, mengurangi jumlah produksi, mengganti bahan baku, atau mengganti sumber energi. Biaya yang dikeluarkan untuk mengurangi

jumlah pencemaran tersebut dikatakan sebagai *abatement cost*. Adanya biaya abatement ini akan mengurangi keuntungan pihak industri, sehingga pada beberapa literatur kurva MAC dinyatakan sebagai MB (*marginal benefit*).

Pada grafik di atas penambahan *abatement cost* akibat pengurangan satu unit pencemaran dinyatakan dengan kurva MAC. Sedangkan biaya yang harus dikeluarkan karena kerusakan lingkungan akibat tingginya pencemaran dinyatakan dengan kurva MD (*marginal damage*). Kurva MD adakalanya juga dikatakan sebagai biaya yang harus dikeluarkan oleh masyarakat karena adanya kerusakan lingkungan berupa MSC (*marginal social cost*).

Jika diasumsikan bahwa sistem ekonomi berjalan sesuai dengan mekanisme pasar bebas, yaitu tidak ada intervensi pemerintah untuk mengendalikan pencemaran, maka pihak industri akan melepas pencemaran sebesar  $\zeta_0$  dengan tidak mengeluarkan biaya sedikitpun untuk mengurangi pencemaran ( $MAC = 0$ ). Sementara itu, tingkat pencemaran yang efisien sebenarnya berada pada  $\zeta^*$  dimana kerusakan marjinal (*marginal damage* = MD) sama dengan biaya pengurangan pencemaran marjinal (MAC). Jika  $\zeta > \zeta^*$ , maka masyarakat harus menanggung biaya lebih mahal berupa kerusakan lingkungan akibat tingginya pencemaran (MD). Sebaliknya jika  $\zeta < \zeta^*$ , masyarakat, dalam hal ini pihak industri, juga harus menanggung biaya produksi yang lebih mahal karena adanya biaya abatement (MAC). Hanya pada tingkat pencemaran sebesar  $\zeta = \zeta^*$  kedua biaya tersebut (MD dan MAC) saling menghilangkan.

Jika pencemaran ditetapkan sampai ke tingkat nol, maka kondisi ini hanya akan tercapai pada saat tidak ada output dari produksi (*zero discharge*) atau biaya pengurangan pencemaran (MAC) yang dikeluarkan oleh industri menjadi tinggi sekali. Perhatikan grafik di atas, jika pencemaran akan dibuat nol, maka titik pada kurva MAC bergerak dari kanan ke kiri. Hal ini secara teoritis mungkin terjadi, tetapi dalam kenyataannya sangat sulit dilaksanakan, karena pencemaran bersifat *pervasive*.

Seperti telah dijelaskan di atas, sulit bagi pemerintah untuk menentukan tingkat pencemaran yang efisien. Demikian juga dalam menentukan jumlah denda atau pajak akibat pencemaran. Jika pemerintah menarik denda atau pajak terlalu tinggi, maka akan mendistorsi industri. Sementara denda atau pajak yang terlalu rendah tidak akan

merangsang industri untuk mengurangi pencemarannya. Meskipun demikian dengan membuat kurva seperti pada Gambar 2, akan dapat ditentukan denda atau pajak berdasarkan titik perpotongan kurva MAC dan MD, yakni pada tingkat harga sebesar  $\varphi$ . Adanya denda atau pajak ini akan menggeser kurva MAC ke kiri menjadi kurva  $MAC_i$ , maka pencemaran yang dihasilkan industri juga akan berkurang dari  $\zeta_0$  ke  $\zeta^*$ .

Denda atau pajak yang ditentukan dengan cara ini akan dapat mengurangi tingkat pencemaran sampai pada level yang paling efisien secara sosial. Karena penerapan denda atau pajak dengan cara ini akan mengurangi kerusakan sebesar daerah (c+d), sementara itu pemerintah memperoleh dana sebesar daerah (a+b). Denda atau pajak ini dapat dilihat sebagai transfer pembayaran dari industri kepada masyarakat melalui pemerintah.

Setelah memahami kurva tingkat pencemaran yang efisien, maka dapat ditentukan instrumen apa yang akan digunakan dalam menangani masalah pencemaran, yaitu (McTaggart, 1996; Field dan Field, 2002; Fauzi, 2004):

1. Denda: merupakan instrumen yang dapat digunakan oleh pemerintah dalam menghadapi pencemaran akibat adanya kelebihan emisi polutan dari suatu perusahaan terhadap BME yang ditetapkan. Denda dibebankan kepada perusahaan dengan harga per satuan kelebihan emisi. Sebelum memberlakukan denda, pemerintah perlu menentukan BME yang paling efisien untuk mengelola pencemaran dengan cara membuat kurva seperti di atas. Institusi yang mengemisikan polutan melebihi BME ( $\zeta^*$ ) harus membayar denda.
2. Pajak: merupakan instrumen ekonomi yang dapat diterapkan pada harga bahan baku atau bahan bakar yang berpotensi mengemisikan pencemar. Makin banyak penggunaan bahan pengemisi pencemar, akan makin besar pajak yang dibayar.
3. Ijin mencemari: merupakan instrumen yang dapat diperjual-belikan antar perusahaan pengemisi polutan, agar jumlah pencemar yang paling efisien ( $\zeta^*$ ) dapat tercapai. Pemerintah menentukan jumlah emisi maksimal per satuan waktu yang boleh diemisikan ke lingkungan berdasarkan kurva di atas, kemudian menjual ijin emisi yang dapat diperjual-belikan (*transferable*

*discharge permit* atau TDP). Suatu institusi dapat membeli seluruh atau sebagian dari TDP lalu menjualnya kembali kepada perusahaan lain. Berbeda dengan pengendalian pencemaran melalui denda atau pajak yang berbasis harga, pengendalian pencemaran melalui TDP bekerja dengan basis kuantitas polutan yang diemisikan.

Indonesia, khususnya di DKI Jakarta sebagai ibukota negara, yang sedang berusaha meningkatkan kesejahteraan masyarakatnya, dapat terganggu dengan adanya polusi deposisi asam yang diprediksi akan menurunkan tingkat kesejahteraan. Untuk itu diperlukan intervensi pemerintah dalam bentuk kebijakan, agar pencemaran deposisi asam dapat dikendalikan.

#### **2.4. Evaluasi kebijakan**

Pengembangan kebijakan mengenai polusi udara dan khususnya yang berkaitan dengan deposisi asam diawali oleh negara yang benar-benar merasakan dampak negatif polusi ini. Contohnya pada akhir tahun 1960-an negara Swedia menunjukkan bukti-bukti telah terjadinya peningkatan kadar keasaman di sungai, danau, dan hutan negara tersebut yang diakibatkan oleh emisi gas-gas  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$  dari negara-negara tetangganya. Bukti-bukti tersebut dapat diberikan oleh Swedia karena pada tahun 1950-an negara ini membentuk EACN (*European Air Chemistry Network*). Hal ini menjadi pencetus bagi negara Swedia untuk mengadakan konferensi lingkungan hidup sedunia di Stockholm pada tahun 1972 (Howells, 1995), salah satu keputusannya adalah polusi udara dinyatakan sebagai masalah lingkungan global. Dan deposisi asam merupakan bagian dari polusi udara.

Diawali oleh negara Swedia, negara-negara Skandinavia juga berhasil mengajak OECD (*the Organisation Economic Cooperation and Development*) untuk menyetujui pengawasan polusi udara yang melintasi Eropa. Tahun 1977 ECE (*the Economic Commission for Europe*) mensponsori pengawasan tersebut. Dalam naungan ECE, negara-negara yang terpolusi oleh deposisi asam dari negara lain, seperti Swedia, Norwegia, dan Finlandia mengambil inisiatif untuk menegosiasikan peraturan yang keras dan mengikat

dalam hal emisi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>. Di sisi lain negara-negara industri yang mengemisikan gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> dari pembakaran BBF-nya menolak berbagai persetujuan untuk mengurangi jumlah emisi gas-gas tersebut.

Di Amerika Utara telah ada kesepakatan antara USA dan Kanada untuk menurunkan emisi gas SO<sub>2</sub> secara signifikan mulai tahun 1990. USA diwakili oleh lembaga *the Clean Air Act*, sedangkan Kanada oleh *the Eastern Acid Rain Program* (Baum, 2001 serta Menz dan Seip, 2004). Namun reduksi terhadap emisi gas penyebab deposisi asam belum memecahkan masalah kerusakan yang menimpa hutan, danau dan ekosistem lainnya di Amerika Utara akibat hujan asam.

Sifat deposisi asam sebagai *transboundary air pollution* menyebabkan perlu adanya kesepakatan antar negara untuk mengatasi pencemaran ini. Berbagai kebijakan antar negara telah dikembangkan untuk mengatasi pencemaran deposisi asam, antara lain adalah:

1. Tahun 1984 konvensi diadakan di Ottawa: sepuluh negara sepakat untuk mengurangi emisi gas SO<sub>2</sub> sebesar 10%.
2. Tahun 1985 Helsinki Protocol yang ditandatangani oleh 21 negara menetapkan pengurangan emisi sulfur sebanyak 30%.
3. Tahun 1988 Sofia Protocol yang ditandatangani oleh 23 negara, mengatur emisi gas nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>).
4. Tahun 1994 Oslo Protocol yang ditandatangani oleh 12 negara, mengatur 30% reduksi emisi gas NO<sub>x</sub>.
5. Tahun 1999 Gothenburg Protocol yang ditandatangani oleh 23 negara, mengatur emisi reduksi 63% sulfur dan 41% gas NO<sub>x</sub>.
6. Di Asia Timur 11 negara anggota EANET bersepakat untuk menurunkan emisi gas SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub>.

EANET (*East Asia network for acid deposition*) merupakan lembaga yang bertanggung jawab pada pengawasan deposisi asam di Asia Timur, dan Indonesia menjadi salah satu dari 11 negara anggota EANET. Lembaga EANET didirikan dengan tujuan untuk (EANET, 2002):

1. mengelola informasi tentang deposisi asam yang ada di negara-negara anggota,

2. membentuk pemahaman dan pengetahuan ilmiah yang umum diantara negara anggotanya, dan
3. memperjelas sumber emisi serta pentingnya menurunkan jumlah emisi gas SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub>.

Indonesia sebagai salah satu negara anggota EANET telah meratifikasi berbagai kebijakan internasional yang berkaitan dengan deposisi asam. Sebagai tindak lanjutnya, telah dikembangkan pula berbagai kebijakan pada skala nasional, seperti dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8 Kebijakan nasional yang berkaitan dengan pencemaran deposisi asam

No	Judul Kebijakan	Isi Kebijakan
1	Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.: KEP.13/MENLH/3/1995 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak	Menetapkan 2 (dua) tahap pemberlakuan BME gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub> , yaitu: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tahap pertama berlaku pada tahun 1995-1999 (BME 1995): emisi total SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> adalah 1500 dan 1700 (mg/m<sup>3</sup>)</li> <li>- Tahap kedua mulai berlaku tanggal 1 Januari 2000 (BME 2000): emisi total SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> adalah 800 dan 1000 (mg/m<sup>3</sup>)</li> </ul>
2	Keputusan Badan Pengendalian Dampak Lingkungan (Bapedal) Nomor: KEP-107/KABAPEDAL/11/1997 tentang Pedoman Teknis Untuk Melakukan Perhitungan Dan Pelaporan Serta Informasi Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU)	Menetapkan cara melakukan perhitungan ISPU, angka dan kategori ISPU, pengaruh ISPU untuk setiap parameter pencemar, dan batas ISPU dalam satuan SI (Standar Internasional)
3	Peraturan Pemerintah (PP) No.41 tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara	Menetapkan perlindungan mutu udara, pengendalian pencemaran udara, dan pengawasan: yang meliputi pembiayaan, ganti rugi, serta sanksi. Baku mutu udara ambien nasional tahunan antara lain adalah: SO <sub>2</sub> = 60 µg/Nm <sup>3</sup> dan NO <sub>2</sub> = 100 µg/Nm <sup>3</sup>
4	Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor: 141 tahun 2003 tentang Ambang Batas Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor Tipe Baru dan Kendaraan Bermotor yang Sedang Diproduksi ( <i>Current Production</i> )	Menetapkan ambang batas emisi gas buang, tata cara dan metoda uji, serta tata cara pelaporan uji emisi gas buang kendaraan bermotor tipe baru dan kendaraan bermotor yang sedang diproduksi.

Tabel 8 (Lanjutan)

No	Judul Kebijakan	Isi Kebijakan
5	Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 252 Tahun 2004 Tentang Program Penilaian Peringkat Hasil Uji Tipe Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor Tipe Baru	Menetapkan Program Penilaian Peringkat Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor Tipe Baru diberlakukan mulai pada tahun 2005, dan hasilnya mulai diumumkan pada tahun 2006.

Pemerintah Indonesia memberlakukan baku mutu emisi (BME) gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> yang dituangkan dalam Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor: KEP.13/MENLH/3/1995. BME adalah batas maksimum emisi yang diperbolehkan dimasukkan ke dalam lingkungan. Fauzi (2004), Field dan Field (2002), serta Callan dan Thomas (2000) menyatakan bahwa idealnya penentuan BME dilakukan dengan membuat kurva MAC (*marginal abatement cost*) dan kurva MD (*marginal damage*), titik perpotongan antar kedua kurva tersebut menyatakan BME yang optimum secara sosial. Penentuan BME melalui kedua kurva ini telah dijelaskan pada sub-bab konsep pengendalian lingkungan.

Selama ini BME yang terdapat dalam kebijakan-kebijakan pemerintah Indonesia mengenai lingkungan hidup diadopsi dari BME yang terdapat pada kebijakan tingkat internasional maupun ditentukan berdasarkan penelitian. BME yang diadopsi dari negara lain seharusnya tidak dapat langsung digunakan, karena pencemaran bersifat spesifik terhadap tempat dan waktu (Field dan Field, 2002 serta Soedomo, 2001). Namun demikian penetapan BME harus didahului dengan penelitian ataupun kajian akademik yang biayanya cukup besar, karena itu tindakan mengadopsi BME dari negara lain dapat dilakukan dengan alasan penghematan.

Pada tingkat yang lebih tinggi terdapat Peraturan Pemerintah (PP) No.41 tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara yang telah mengatur baku mutu udara ambien (BMA), emisi dan monitoring parameter pencemar serta bagaimana prosedur penalti terhadap institusi yang emisinya melebihi BME. Dalam kasus pencemaran deposisi asam, Pemerintah Indonesia belum memiliki prosedur kontrol yang secara efektif dapat memonitor jumlah emisi gas SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> dari sumbernya. Belum adanya kebijakan mengenai monitoring ini menyebabkan belum dapat diterapkan sistem penalti

bagi institusi yang melanggar ketentuan BME, sehingga pengendalian terhadap emisi gas  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$  masih sulit dilaksanakan.

Lebih jauh lagi, dalam PP No.41 tersebut berbagai pembiayaan sebagai akibat dari upaya pengendalian pencemaran udara menjadi tanggung jawab pelaku kegiatan yang mengemisikan polutan. Akibatnya pemantauan dan upaya mereduksi emisi harus dilakukan sendiri oleh pelaku kegiatan, sehingga bersifat sukarela. Dalam kasus terjadi kelebihan emisi yang mengakibatkan pencemaran udara, PP ini hanya mengatur penalti atau sanksi yang bersifat normatif. Idealnya peraturan mengenai pengendalian pencemaran udara harus memberikan penalti yang jelas terhadap kelebihan emisi yang dilakukan oleh pelaku kegiatan terkait.

Prosedur pengendalian pencemaran udara dalam PP No. 41/1999 mengatur langkah-langkah untuk mempersiapkan program kerja penanggulangan dan pemulihan mutu udara setelah terjadinya kualitas udara ambien yang melampaui BMA. Apabila BMA tidak terlampaui, tidak ada kewajiban untuk mempersiapkan program kerja pencegahan. Untuk itu perlu dibuat kebijakan mengenai langkah-langkah guna melaksanakan upaya pencegahan penurunan mutu udara.

Menindaklanjuti kebijakan-kebijakan nasional yang berkaitan dengan pencemaran udara, maka pada tingkat provinsi pemerintah DKI Jakarta juga telah mengembangkan peraturan-peraturan untuk mengelola lingkungan udara di wilayah ibukota. Berbagai peraturan yang terkait dengan pencemaran deposisi asam yang telah dikembangkan Pemprov DKI Jakarta terlihat pada Tabel 1. Kebijakan-kebijakan tersebut selain menetapkan BME juga menetapkan BMA (baku mutu udara ambien). Penetapan BMA ini sangat penting mengingat manusia serta reseptor lainnya, seperti hewan, tanaman, dan lingkungan abiotik, yang berpotensi terkena dampak polusi deposisi asam berkontak langsung dengan udara ambien. Jika monitoring terhadap emisi polutan pada sumbernya sulit dilaksanakan, tidak demikian halnya dengan monitoring terhadap udara ambien. Karena secara kontinyu Bapedalda dan BMG melaksanakan pengukuran konsentrasi berbagai polutan di udara ambien.

Kebijakan yang mengatur BME di provinsi DKI Jakarta secara umum diadopsi dari peraturan-peraturan yang berlaku pada tingkat nasional. Keputusan Gubernur DKI No 1041 tahun 2000 tentang Baku Mutu Udara Emisi Kendaraan Bermotor di Provinsi

DKI Jakarta menetapkan pemberlakuan BME gas-gas yang diemisikan berbagai jenis kendaraan yaitu gas CO (karbon monoksida) dan HC (hidrokarbon). Keputusan Gubernur di atas merupakan peraturan daerah (Perda) yang masih berlaku sampai saat ini, tetapi tidak menetapkan baku mutu terhadap emisi gas-gas yang menjadi penyebab terjadinya deposisi asam dari sumber emisi bergerak, dalam hal ini kendaraan bermotor. Padahal dalam Perda yang berlaku sebelumnya yaitu Keputusan Gubernur Kepala Daerah Khusus Ibukota Jakarta Nomor: 1222 Tahun 1990 tentang hal yang sama telah mengatur BME gas CO, HC, NO<sub>x</sub> dan asap yang dikeluarkan dari berbagai jenis kendaraan dengan variasi bahan bakar yang digunakan.

Dapat dikatakan bahwa kebijakan pemerintah provinsi DKI Jakarta terhadap perlindungan udara yang bersumber dari emisi kendaraan bermotor yang berlaku mulai tahun 1990 sampai dengan tahun 2000 lebih detail dan lebih berpihak kepada upaya konservasi lingkungan dibandingkan dengan kebijakan penggantinya. Perda nomor 1222 tahun 1990 tersebut secara lebih spesifik menyebutkan bahwa jenis kendaraan dengan bahan bakar tertentu hanya boleh memberikan emisi maksimum gas CO, HC, NO<sub>x</sub> dan asap. Seperti diketahui bahwa gas NO<sub>x</sub> merupakan salah satu gas penyebab deposisi asam. Pada Perda yang berlaku saat ini, yaitu Keputusan Gubernur DKI No 1041 tahun 2000, gas penyebab deposisi asam yang dikeluarkan oleh kendaraan malahan tidak diatur emisi maksimumnya.

Idealnya kebijakan yang lebih akhir dikembangkan dapat berfungsi lebih baik dibandingkan dengan kebijakan yang digantikannya. Kenyataannya kebijakan yang berlaku sekarang di DKI Jakarta mengenai BME gas-gas pencemar udara yang berasal dari kendaraan bermotor semakin tidak berpihak kepada aspek lingkungan. Mungkin Keputusan Gubernur DKI No 1041 tahun 2000 dikembangkan berdasarkan tujuan pertumbuhan ekonomi, sehingga aspek lingkungan kurang diprioritaskan. Padahal dengan kebijakan sebelumnya yang lebih detail mengatur emisi polutan saja pencemaran udara di DKI Jakarta yang berasal dari kendaraan bermotor cukup tinggi (PE-UI, 2004). Perda yang sekarang berlaku dikhawatirkan akan makin menurunkan tingkat kualitas udara DKI Jakarta, yang pada akhirnya juga diprediksi akan menurunkan tingkat kesejahteraan penduduknya.

Keputusan Gubernur DKI No 551 tahun 2001 tentang Penetapan Baku Mutu Udara Ambien (BMA) dan Baku Tingkat Kebisingan di Provinsi DKI Jakarta mengatur

BMA yang lebih ketat dibandingkan kebijakan nasional, yaitu Peraturan Pemerintah (PP) No.41 tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Pada Perda DKI yang berlaku mulai tahun 2001 BMA untuk gas  $\text{NO}_2$  yang diukur pada 1 tahun baku mutunya adalah  $60 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Sedangkan pada PP yang berlaku mulai tahun 1999 BMA nasional tahunan gas  $\text{NO}_2$  adalah  $100 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Penetapan BMA yang lebih rendah dibandingkan dengan BMA nasional ini dapat dimaklumi mengingat DKI Jakarta sebagai ibukota negara tentunya diharapkan dapat memiliki kualitas udara yang mendekati standar internasional, seperti yang ditetapkan oleh WHO.

Pada Perda Provinsi DKI Jakarta Nomor 2 Tahun 2005 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara para pelaku aktivitas yang mengeluarkan emisi diatas BME diancam dengan pidana kurungan paling lama 6 (enam) bulan atau denda sebanyak-banyaknya Rp.50.000.000,- (lima puluh juta rupiah). Meskipun Perda ini mengatur penalti lebih spesifik dibandingkan PP No. 41/1999, namun idealnya penalti yang ditetapkan pada pelaku pencemaran memiliki rentangan berdasarkan volume, waktu dan dampak terhadap pencemarannya. Jika penalti hanya ditentukan batas maksimalnya, seperti pada Perda No. 2 tahun 2005, maka ada kecenderungan dari pelaku kegiatan industri untuk melakukan pencemaran pada kondisi maksimum, sepanjang keuntungan yang diperoleh akan lebih besar dibandingkan dengan penalti yang harus dibayarnya.

Dari evaluasi terhadap berbagai kebijakan lingkungan udara yang telah dikembangkan Pemprov DKI Jakarta terlihat bahwa pengembangan kebijakan untuk mengendalikan pencemaran lingkungan bukanlah merupakan hal yang mudah. Pengembangan kebijakan lingkungan haruslah bersifat komprehensif, terutama yang mengatur polusi deposisi asam, karena polusi ini berdampak luas dan sangat erat kaitannya dengan upaya peningkatan kesejahteraan. Dengan alasan ini pengembangan kebijakan untuk mengendalikan pencemaran deposisi asam haruslah memperhatikan aspek ekonomi dan sosial, di samping aspek lingkungan. Sebagai contoh adalah kebijakan subsidi BBM didasarkan pada kondisi sosial masyarakat yang masih rendah, semula diharapkan dapat meningkatkan taraf hidup mereka. Namun subsidi tersebut malahan menyebabkan borosnya penggunaan BBM, dan pada akhirnya merusak lingkungan serta memberatkan perekonomian nasional.

Mengapa pengembangan kebijakan lingkungan bukan merupakan hal yang mudah? Salah satu sebabnya adalah informasi ataupun data mengenai kondisi lingkungan tidak mudah didapat. Selain itu kebijakan lingkungan tidak dapat berlaku secara parsial, karena sifat degradasi lingkungan tidak mengenal batas teritorial. Untuk itu pengembangan kebijakan lingkungan dapat dilakukan melalui metode *modelling* atau pemodelan.

## 2.5. Asesmen Kebijakan Lingkungan Melalui Pemodelan

Penelitian dan studi mengenai deposisi asam tidak hanya menghasilkan pengetahuan mengenai dampak negatif deposisi asam dan kemajuan teknologi serta metodologi guna mereduksi polusi ini, tetapi juga menghasilkan berbagai model untuk menganalisis deposisi asam. Hasil pengembangan model tersebut antara lain dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9 Beberapa model untuk menganalisis deposisi asam

No	Nama	Peruntukan	Sumber
1	DAM ( <i>Duddon Acidification Model</i> )	mempelajari perubahan kandungan aluminium akibat adanya deposisi asam	Howells, 1995
2	ILWAS ( <i>Integrated Lake Water Acidification Study</i> )	menganalisis pengaruh deposisi asam terhadap ekosistem terestrial dan ekosistem akuatik	Howells, 1995 dan Tietenberg, 1998
3	MAGIC ( <i>Modelling Acidification of Groundwater In Catchments</i> )	mempelajari mekanisme dan proses kimia yang terjadi pada air permukaan akibat adanya deposisi asam	Howells, 1995
4	RADM ( <i>Regional Acid Deposition Model</i> )	memprediksi deposisi asam di Amerika Utara dan Eropa	Howells, 1995
5	RAIN ( <i>Reversing Acidification In Norway</i> ) dan RAINS-ASIA ( <i>Regional Acidification Information and Simulation</i> )	mempelajari kapasitas netralisasi asam dari air maupun tanah yang terkena deposisi asam	Howells, 1995; Nakada dan Pearce, 1998
6	TAF ( <i>Tracking and Analysis Framework</i> )	mempelajari <i>cost and benefit</i> dari usaha mereduksi emisi gas-gas penyebab deposisi asam	Burtraw, <i>et al.</i> , 1997

Dari berbagai model yang tertera pada Tabel 9 belum ada pengembangan model yang secara komprehensif mengestimasi dan memprediksi nilai ekonomi dari kerusakan yang ditimbulkan oleh deposisi asam sampai dengan memberikan alternatif-alternatif kebijakan untuk mengendalikan polusi ini. Padahal dari penjabaran pada bab ini maupun bab terdahulu diketahui bahwa pengelolaan polusi deposisi asam tidak cukup dengan teknologi dan metodologi untuk mereduksi emisi gas-gas penyebabnya. Karena polusi ini terkait erat dengan kesejahteraan masyarakat, maka diperlukan kebijakan yang diharapkan dapat berfungsi secara efektif guna mengubah perilaku masyarakat yang selalu berupaya untuk meningkatkan kesejahteraannya.

Mengingat kompleksnya berbagai aspek yang terkait dengan polusi deposisi asam, maka diperlukan suatu kerangka pikir yang dikenal sebagai pendekatan sistem untuk mencari keterpaduan antar bagian melalui pemahaman yang utuh (Eriyatno, 2003). Pendekatan sistem merupakan cara penyelesaian persoalan yang dimulai dengan identifikasi terhadap adanya sejumlah kebutuhan sehingga dapat menghasilkan suatu operasi dari model yang dianggap efektif.

Muhammadi, *et al.* (2001) menyatakan bahwa model adalah bentuk uraian, gambar atau rumus yang dibuat untuk menirukan suatu gejala atau proses, yang dapat dikelompokkan atas model kualitatif (seperti: gambar atau diagram), model kuantitatif (seperti: model matematik, statistik) dan model ikonik (seperti: maket, prototipe mesin). Dalam penelitian ini model yang dikembangkan adalah model kuantitatif matematik. Pengembangan model kuantitatif biasanya tidak dilakukan sekaligus, melainkan dengan mengembangkan beberapa model yang berfungsi sebagai sub-model. Pada penelitian ini ada 3 model yang akan dikembangkan untuk mencapai tujuan penelitian, yaitu:

1. Model yang digunakan untuk menganalisis jumlah optimal BBF yang dapat dikonsumsi oleh penduduk DKI Jakarta sebagai sumber energi dengan memberi dampak pencemaran deposisi asam minimal terhadap lingkungan, dikembangkan dengan metode *goal programming*. Lebih lanjut model ini digunakan untuk menganalisis tingkat pemborosan penggunaan BBF.
2. Model yang digunakan untuk menilai kerusakan lingkungan yang disebabkan oleh deposisi asam akibat penggunaan BBF sebagai sumber energi dan

memprediksi nilai kerusakannya di masa yang akan datang dilakukan dengan menggunakan metode simulasi sistem dinamik.

3. Model formulasi alternatif kebijakan untuk mengendalikan pencemaran deposisi asam, dikembangkan dengan metode analisis multi kriteria.

Jadi pengembangan ketiga model dalam penelitian ini dilaksanakan dengan 3 tahap, yaitu:

Tahap pertama: Model optimasi yang dikembangkan dengan metode *goal programming* (GP), yaitu metode yang digunakan untuk menghubungkan antara tujuan (*objective*) dan hambatan (*constraint*) yang tidak seluruhnya lengkap (Trick, 1996). Tujuan dari metode GP adalah untuk meminimalkan deviasi dari multi tujuan terhadap performans relatifnya.

GP dirumuskan dalam konteks masalah linier programming, tetapi prinsip-prinsipnya dibangun melalui masalah yang bersifat non linier. Menurut Thompson dan Thore (1992) linier GP dapat dirumuskan sebagai:

$$\sum_{i=1}^k a_{ij} x_j = g_i + g_i^+ - g_i^- \dots\dots\dots (2.15)$$

dimana:

$a_{ij}$  = jumlah unit input

$x_j$  = jumlah unit produk

$g_i$  = *goal* atau target dari variabel yang ingin dicapai, misalnya target emisi atau konsentrasi polutan yang dinyatakan dalam baku mutu emisi (BME) atau baku mutu udara ambien (BMA)

$g_i^+$  = ekses performans relatif terhadap *goal*, misalnya penalti akibat kelebihan polutan yang diemisikan

$g_i^-$  = defisit performans relatif terhadap *goal*, misalnya penalti karena kekurangan produksi akibat adanya pembatasan jumlah emisi polutan

$i$  dan  $j$  = bilangan bulat yang menyatakan tujuan ke  $i$  dan  $j$

Dalam penelitian ini, persamaan di atas dapat disederhanakan untuk menyatakan jumlah penalti minimal yang akan diperoleh, menjadi:

$$\text{Min } (qA)x + Mg^+ + Ng^- \dots\dots\dots (2.16)$$

dimana:

$qA$  = jumlah input

$x$  = biaya per satuan input

$M$  = biaya penalti per satuan kelebihan polutan

$N$  = biaya kerugian per satuan kekurangan produk

dengan batasan:

$g^+ \cdot g^- = 0$  yang berarti kedua deviasi tidak boleh positif secara bersamaan

$x, g^+, g^- \geq 0$  yang berarti jumlah produk dan kedua deviasi tidak boleh bernilai negatif

Model optimasi yang dikembangkan dengan metode *goal programming* bersifat statis, sedangkan kebijakan lingkungan yang akan dikembangkan bersifat dinamis. Sebagai penyempurnaan model optimasi, dilakukan pengembangan model estimasi dengan menggunakan metode simulasi sistem dinamik.

Tahap kedua: Pengembangan model estimasi menggunakan metode simulasi sistem dinamik untuk menilai kerusakan lingkungan yang disebabkan oleh deposisi asam. Model simulasi sistem dinamik dikembangkan menggunakan perangkat lunak VENSIM (Pedercini, 2003 dan Barney *et al.*, 1998).

Menurut Fauzi (2004a) tujuan dari model adalah membangun skenario "*what would happen*" terhadap sistem yang diamati, sehingga sering juga disebut sebagai "*scenario modelling*". Model simulasi lebih mengandalkan prinsip hubungan sebab-akibat dan hasilnya dapat digunakan untuk prediksi. Sedangkan Muhammadi *et al.* (2001) menyatakan dalam sistem dinamis proses perumusan mekanisme merupakan penyederhanaan dari suatu kerumitan atau kompleksitas untuk menciptakan sebuah

konsep model (*mental model*). Penyederhanaan kerumitan bukan berarti mengabaikan unsur-unsur yang saling mempengaruhi untuk membentuk unjuk kerja sistem secara keseluruhan. Penyederhanaan kerumitan ada 2 jenis, yaitu kerumitan rinci (*detail complexity*) dan kerumitan perubahan (*dynamic complexity*).

Hasil penyederhanaan biasanya dituangkan dalam bentuk diagram yang berisi simpal-simpal (*loops*) yang menunjukkan struktur dan mekanisme dinamis yang mempengaruhi proses dalam menghasilkan kejadian nyata. Semakin banyak simpal dalam diagram menggambarkan makin banyaknya variabel (unsur) dan parameter yang berarti semakin rinci dan dinamis model yang dikembangkan.

Untuk menentukan variabel dan parameter yang akan diterapkan dalam model dinamis digunakan metode *ordinary least square* (OLS). Metode OLS digunakan untuk melihat hubungan antar variabel yang digunakan dalam penelitian. Secara prinsip metode OLS bertujuan untuk menentukan estimator *least square*  $\alpha$ ,  $\beta$  dan  $\gamma$ , sehingga persamaan regresi  $Y_t = \alpha + \beta X_t + \gamma Z_t + \varepsilon_t$  dengan  $Y_t$  merupakan parameter yang diprediksi mempunyai jarak terpendek pada garis regresi dan  $\varepsilon_t$  adalah random error. Dengan demikian  $Y_t$  merupakan pilihan terbaik bagi variabel yang dimaksud (Shazam, 2004).

Kinerja model simulasi perlu divalidasi untuk memperoleh keyakinan sejauh mana "kinerja" model sesuai (*compatible*) dengan "kinerja" sistem nyata, sehingga model yang dihasilkan memenuhi syarat sebagai model ilmiah yang taat fakta (Muhammadi *et al.*, 2001). Validasi kinerja model dilakukan dengan melihat sejauh mana perilaku "output" model sesuai dengan data empirik. Salah satu cara untuk melakukan validasi model adalah dengan melakukan uji statistik untuk melihat penyimpangan antara output simulasi dengan data aktual, yang berupa nilai AME (*absolute means error*). AME adalah penyimpangan antara nilai rata-rata simulasi terhadap nilai aktual, makin kecil nilainya akan semakin baik. Namun demikian untuk kondisi udara selisih antara nilai pengamatan dan model diduga dapat mencapai 100%, karena pada pengamatan terdapat pengecualian lingkungan yang berdampak pada kapasitas dispersi atmosfer, dan hal ini tidak diperhitungkan dalam model (Schnelle dan Dey, 2000).

Setelah divalidasi, suatu model juga perlu diuji responnya terhadap suatu stimulus melalui uji sensitivitas. Respon dari model ditunjukkan dengan perubahan perilaku dan atau kinerja model, sedangkan stimulus yang diberikan pada model dapat berupa

perlakuan tertentu pada unsur atau struktur model. Uji sensitivitas yang dilakukan pada model bertujuan untuk menjelaskan seberapa jauh sensitivitas parameter, variabel, dan hubungan antar variabel dalam model.

Meskipun telah divalidasi dan diuji sensitivitasnya, namun model simulasi sistem dinamik belum dapat digunakan untuk memberikan alternatif kebijakan dari berbagai kriteria yang diperoleh. Untuk itu pada tahap akhir penelitian ini dikembangkan model alternatif kebijakan melalui metode analisis multi kriteria (MCDA).

Tahap ketiga: Pengembangan model alternatif kebijakan melalui metode analisis multi kriteria (*multi criteria decision analysis* atau MCDA) dilaksanakan guna memformulasikan alternatif-alternatif kebijakan untuk mengendalikan pencemaran deposisi asam. Menurut Belton dan Stewart (2002) kriteria adalah alat atau standar untuk melakukan pertimbangan. Dalam konteks pengambilan keputusan, kriteria secara tidak langsung dapat menyatakan standar urutan dalam memilih alternatif. Jadi pengambilan keputusan melalui analisis multi kriteria (MCDA) adalah pemilihan alternatif terbaik dengan mempertimbangkan setiap kriteria dari alternatif-alternatif yang ada.

Masing-masing alternatif ditetapkan kriteria dan bobotnya, sehingga dapat dilakukan MCDA untuk menentukan alternatif mana yang sebaiknya diambil oleh pengambil keputusan. Dalam penelitian ini analisis multi kriteria dilakukan dengan program komputer PRIME (*preference ratios in multiattribute evaluation*), hasilnya berupa urutan prioritas skenario yang disarankan untuk diimplementasikan. Menurut Triantaphyllou dan Sánchez (1997) secara ringkas teknik urutan pengembangan MCDA meliputi 3 tahap, yaitu:

1. Menentukan alternatif-alternatif dan kriteria yang relevan. Dalam penelitian ini alternatif-alternatif beserta kriterianya ditentukan berdasarkan hasil pengembangan model pada tahap pertama dan kedua, yaitu model optimasi dan model estimasi.
2. Memberikan bobot relatif dari masing-masing kriteria pada dampaknya terhadap tiap alternatif. Bobot dari tiap kriteria diperoleh dengan melakukan *running* berulang-kali terhadap model simulasi sistem dinamik yang telah dikembangkan pada tahap kedua penelitian ini. Untuk kriteria yang belum

diperhitungkan pada model simulasi sistem dinamik pembobotan dilakukan secara kualitatif.

3. Memproses nilai kuantitatif untuk menentukan urutan masing-masing alternatif.

Pengembangan model MCDA dengan bantuan program komputer PRIME dapat memenuhi ketiga tahap yang dijelaskan oleh Triantaphyllou dan Sánchez (1997) di atas. Hal ini merupakan salah satu kekuatan perangkat lunak PRIME yang dapat mengkombinasikan pembobotan kuantitatif dan kualitatif.

Hasil dari MCDA berupa matriks keputusan yang pada sumbu vertikalnya terlihat alternatif-alternatif yang telah ditentukan dan pada sumbu horisontalnya terlihat nilai interval dari tiap-tiap kriteria. Secara umum matriks keputusan dapat digambarkan sebagai tabel berikut:

Tabel 10 Matriks keputusan pada metode MCDA

Alternatif	Kriteria				
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	...	$C_N$
	$W_1$	$W_2$	$W_3$	...	$W_N$
$A_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	...	$a_{1N}$
$A_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	...	$a_{2N}$
$A_3$	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$	...	$a_{3N}$
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
$A_M$	$a_{M1}$	$a_{M2}$	$a_{M3}$	...	$a_{MN}$

Sumber: Triantaphyllou dan Sánchez, 1997

Kerangan Tabel:

- Alternatif dinyatakan dengan  $A_i$  (untuk  $i = 1, 2, 3, \dots, M$ ).
- Kriteria dinyatakan dengan  $C_j$  (untuk  $j = 1, 2, 3, \dots, N$ ). Kriteria yang digunakan dalam penelitian ini merupakan faktor-faktor yang telah dievaluasi melalui metoda *Goal Programming* dan simulasi sistem dinamik.

- Masing-masing kriteria diberi bobot yang dinyatakan dengan  $W_j$ . Bobot yang diberikan pada penelitian ini didasarkan pada nilai-nilai yang dihasilkan dari simulasi sistem dinamik dan *judgement* kualitatif.
- Nilai dari bobot untuk tiap kriteria terhadap alternatif yang relevan dinyatakan dengan  $a_{ij}$  (untuk  $i = 1,2,3, \dots, M$  dan  $j = 1,2,3, \dots, N$ ).

Pada dasarnya analisis keputusan menggunakan MCDA adalah menentukan keputusan terbaik menggunakan program linier dengan memberikan bobot terhadap kriteria atau atribut dari masing-masing tujuan yang akan dicapai. Beberapa pendekatan digunakan untuk menentukan prioritas alternatif yang dinyatakan dalam bentuk kriteria-kriteria yang diberikan, diantaranya metode *weight sum model* (WSM) dan *weighted product model* (WPM). Metode WSM menghitung nilai preferensi dari masing-masing alternatif dengan rumus berikut (Fauzi, 2005; Triantaphyllou dan Sanchez, 1997):

$$P_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} W_j \text{ untuk } i=1,2,3,\dots,m \dots\dots\dots (2.17)$$

dimana:

$P_i$  = preferensi ke  $i$  dari alternatif ke  $A_i$

$a_{ij}$  = nilai dari bobot untuk tiap kriteria terhadap alternatif yang relevan  
(untuk  $i = 1,2,3, \dots, M$  dan  $j = 1,2,3, \dots, N$ )

$W_j$  = bobot dari kriteria ke  $j$

Alternatif terbaik dalam WSM adalah yang memiliki nilai preferensi terbesar. Metode ini menggunakan asumsi penjumlahan utilitas. WSM hanya dapat digunakan pada saat kriteria untuk pengambilan keputusan dapat diekspresikan pada satuan pengukuran yang identik.

WPM (*weighted product model*) hampir sama dengan WSM. Perbedaan yang utama adalah pada WSM dilakukan penjumlahan sedangkan pada WPM dilakukan perkalian. Tiap alternatif dibandingkan terhadap alternatif yang lain melalui perkalian dari angka perbandingan (rasio) tiap-tiap kriteria. Tiap rasio akan meningkat terhadap bobot relatifnya. Secara umum untuk membandingkan alternatif  $A_p$  terhadap alternatif  $A_q$  digunakan rumus (Fauzi, 2005; Triantaphyllou dan Sanchez, 1997):

$$R\left(\frac{A_p}{A_q}\right) = \prod_{j=1}^n \left(\frac{a_{pj}}{a_{qj}}\right)^{w_j} \dots\dots\dots (2.18)$$

Jika rasio  $R(A_p/A_q) \geq 1$ , maka keputusannya alternatif  $A_p$  lebih diinginkan daripada alternatif  $A_q$ . Alternatif terbaik adalah alternatif yang memiliki nilai rasio tertinggi dibandingkan dengan alternatif-alternatif lain. WPM kadangkala dikatakan sebagai analisis tanpa dimensi, karena strukturnya menghilangkan satuan-satuan pengukuran.

Secara umum pengertian MCDA menurut Fauzi (2005) adalah teknik pengambilan keputusan multi-variabel berbasis non-parametrik, berupa pemilihan alternatif terbaik dengan mempertimbangkan setiap kriteria dari alternatif tersebut. Hasil pengolahan dari pertimbangan setiap kriteria dan alternatif dalam perangkat lunak PRIME meliputi (Gustafsson *et al.*, 2001):

1. *value-interval* untuk setiap alternatif,
2. bobot (*weight*) interval untuk setiap atribut, dan
3. matriks dominan, serta
4. *decision rule* untuk membandingkan antar alternatif, dalam *decision rule* terdapat 4 aturan (*rule*) yang dapat digunakan untuk memberikan rekomendasi keputusan, yaitu:
  - a. *maximax*: alternatif yang memiliki nilai kemungkinan terbesar.
  - b. *maximin*: alternatif yang memiliki nilai kemungkinan terkecil.
  - c. *minimax regret*: alternatif yang memiliki PLV (*possible loss value*) terkecil.
  - d. *central value*: alternatif yang memiliki nilai tengah value-interval terbesar.

Secara umum dapat dikatakan tahap ketiga dari penelitian ini merupakan penyempurnaan dari pengembangan model pada tahap-tahap sebelumnya, yang berupa model optimasi dengan metode *goal programming* dan model estimasi dengan simulasi sistem dinamik. Ketiga tahap pengembangan model dalam penelitian ini akan dibahas lebih detail pada bab berikutnya mengenai metode penelitian.

### III. METODE PENELITIAN

Dari latar belakang dan tujuan penelitian yang diuraikan pada bab pertama dan studi kepustakaan yang telah dijabarkan pada bab kedua disertasi ini, maka dibuat kerangka pemikiran sebagai dasar penelitian. Sub-bab berikut akan membahas hal tersebut, dan sub-bab selanjutnya menjabarkan pengembangan peta penelitian serta teknik pengembangan model yang digunakan.

#### 3.1. Kerangka Pemikiran

Pengembangan kerangka pemikiran pada penelitian mengenai deposisi asam dalam disertasi ini diawali dengan adanya keinginan penduduk DKI Jakarta untuk meningkatkan kualitas hidupnya melalui pembangunan yang selalu disertai dengan peningkatan kebutuhan energi. Peningkatan kualitas hidup dijabarkan dalam perubahan PDRB (produk domestik regional bruto) dan peningkatan jumlah kendaraan. Peningkatan kebutuhan energi direpresentasikan dalam variabel produksi listrik. Sedangkan sumber energi sebagian besar diperoleh melalui pembakaran BBF yang digambarkan dengan volume bahan bakar yang dikonsumsi. Meskipun peningkatan kebutuhan energi diikuti dengan adanya keterbatasan sumber energi, namun dalam penelitian ini keterbatasan sumber energi dalam kaitannya dengan polusi deposisi asam belum dianalisis.

Selain menghasilkan energi, pembakaran BBF juga mengemisikan gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  ke atmosfer yang jika berinteraksi dengan faktor iklim berupa hujan, angin dan kelembaban akan menimbulkan pencemaran berupa deposisi asam. Faktor iklim yang ditinjau dalam penelitian ini adalah hujan dan temperatur rata-rata tahunan. Sedangkan hasil interaksi antara emisi gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  dengan faktor-faktor iklim digambarkan dengan konsentrasi ambien gas-gas penyebab deposisi asam tersebut.

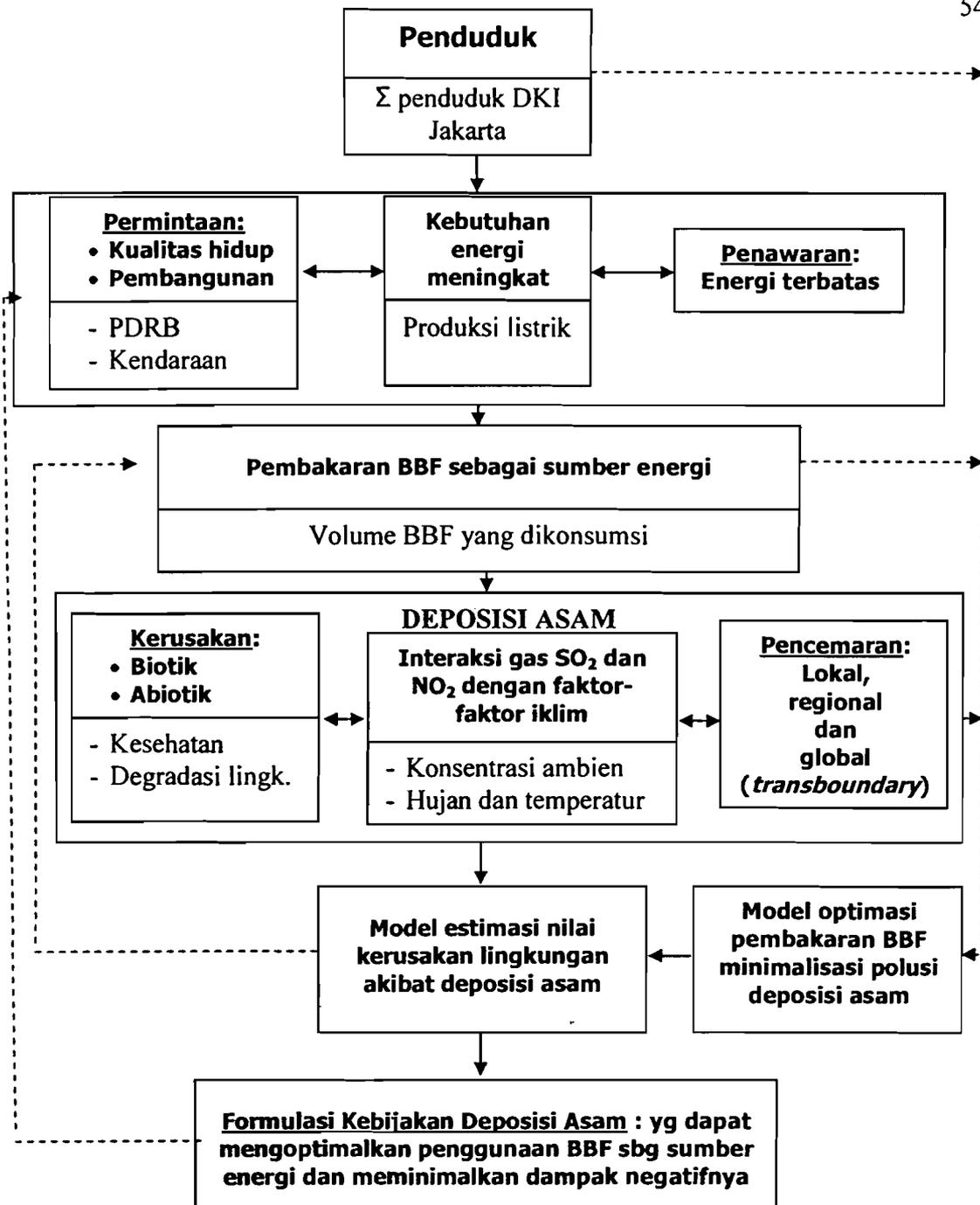
Angin akan menyebabkan emisi gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  dapat terbawa ke daerah lain dan jatuh pada areal yang jauh dari sumber emisinya, sehingga pencemaran deposisi asam dikatakan sebagai polusi udara lintas batas (*transboundary air pollution*). Sifat deposisi asam sebagai polusi udara lintas batas menyebabkan polusi ini berdampak negatif pada skala lokal, regional, maupun global. Dalam penelitian ini yang akan

dipelajari hanyalah dampak lokal yang ditimbulkan oleh deposisi asam. Dampak deposisi asam dalam skala regional maupun global belum ditinjau dalam penelitian ini.

Dampak negatif deposisi asam tidak hanya berpengaruh pada lingkungan biotik seperti manusia dan hewan serta tumbuhan, tetapi juga pada lingkungan abiotik seperti tanah, air, dan udara, serta material, terutama yang berupa bangunan. Kerusakan biotik akibat deposisi asam dalam penelitian ini direpresentasikan dengan penurunan kesehatan penduduk yang diprediksi berdasarkan hasil-hasil penelitian terdahulu. Kerusakan abiotik digambarkan dengan adanya degradasi lingkungan akibat meningkatnya konsentrasi gas-gas penyebab deposisi asam di udara ambien.

Pencemaran deposisi asam di DKI Jakarta semakin meningkat dengan terjadinya pemborosan penggunaan BBF yang digunakan sebagai sumber energi. Karena itu perlu dilakukan analisis agar dapat menjawab seberapa jauh kebutuhan energi yang dapat diperoleh dari pembakaran BBF tanpa terlalu mengorbankan lingkungan DKI Jakarta yang akan rusak akibat polusi deposisi asam. Hasil analisis ini digunakan meninjau apakah penggunaan BBF dilakukan dengan boros dan untuk mengestimasi nilai kerusakan lingkungan akibat deposisi asam yang ditimbulkan serta memprediksi nilai tersebut di masa yang akan datang. Model estimasi dalam penelitian ini secara umum dikembangkan melalui proses *monetizing* nilai-nilai kerusakan yang ditimbulkan oleh polusi deposisi asam. Akhirnya diperlukan perangkat kebijakan untuk mengendalikan pencemaran deposisi asam, agar kerusakan yang ditimbulkannya tidak terlalu merugikan masyarakat yang sedang berusaha meningkatkan taraf hidup.

Secara diagramatik kerangka pemikiran dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3. Diagram tersebut menggambarkan keterkaitan antar aspek yang dikaji dalam penelitian. Kotak yang terbagi menjadi 2 bagian menyatakan aspek yang dikaji dalam penelitian di bagian atas, sedangkan bagian bawah kotak menyatakan variabel yang mewakili aspek tersebut.



Gambar 3 Kerangka pemikiran penelitian model kebijakan untuk pengendalian deposisi asam di provinsi DKI Jakarta

Penelitian tentang deposisi asam dalam disertasi ini dilakukan dengan menggunakan pemodelan yang alur pengembangannya didasarkan pada kerangka

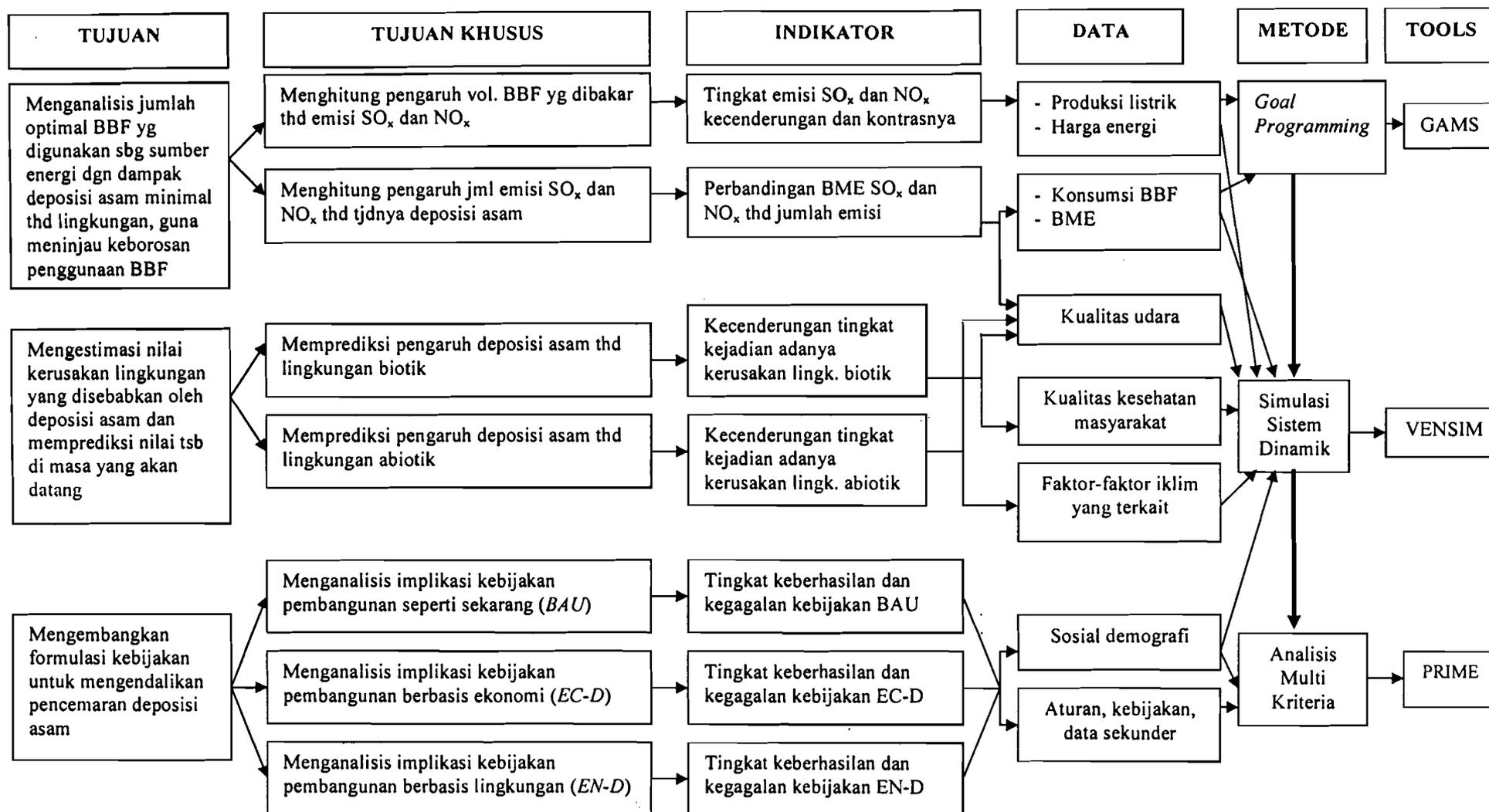
pemikiran di atas. Guna mengetahui alur pengembangan model secara lebih terstruktur, maka tujuan penelitian beserta variabel-variabel yang tertera pada kerangka pemikiran selanjutnya dipetakan dalam peta penelitian, seperti yang akan dibahas pada sub-bab berikut.

### 3.2. Peta Penelitian dan Teknik Pengembangan Model

Dari kerangka pemikiran beserta variabel-variabel yang terkait, dibuatlah peta penelitian yang secara umum merupakan *docking analysis* dari proses pengembangan model dalam penelitian. Peta penelitian menggambarkan tujuan umum, tujuan khusus, indikator, dan jenis data yang digunakan dalam penelitian. Metode serta jenis perangkat lunak yang mendukung penelitian juga tertera pada peta penelitian, seperti dapat dilihat pada Gambar 4.

Dari peta penelitian terlihat alur pengembangan model yang dilaksanakan dalam penelitian, guna mencapai ketiga tujuan penelitian. Ketiga tujuan penelitian di-*breakdown* menjadi 7 sub-tujuan atau tujuan khusus penelitian, dengan berbagai indikator. Variabel-variabel yang telah ditentukan pada kerangka pemikiran dicari datanya dan dalam peta penelitian diletakkan pada kolom "data". Data penduduk DKI Jakarta, PDRB, kendaraan, produksi listrik, dan konsumsi BBF yang tertera di kerangka pemikiran, dalam peta penelitian dikelompokkan ke dalam data sosial demografi. Data konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> sebagai penyebab polusi deposisi asam termasuk data kualitas udara, yang juga dipengaruhi oleh data faktor-faktor iklim, yang berupa hujan dan temperatur rata-rata. Data kualitas kesehatan masyarakat diasumsikan dapat merepresentasikan kerusakan lingkungan biotik yang diakibatkan oleh deposisi asam. Data harga energi dan BME yang digunakan dalam metode *goal programming* sebenarnya merupakan bagian dari data mengenai aturan dan kebijakan.

Dua kolom terakhir pada peta penelitian berisi metode dan alat bantu atau perangkat lunak yang digunakan untuk mengembangkan model. Pada kolom "metode" terlihat bahwa digunakan 3 teknik analisis dalam mengembangkan sistem pada penelitian ini yaitu: metode *Goal Programming* dan Simulasi Sistem Dinamik, serta Analisis Multi



Gambar 4 Peta penelitian: Model kebijakan untuk pengendalian deposisi asam di provinsi DKI Jakarta (*Docking analysis*)

Kriteria. Sedangkan perangkat lunak yang digunakan adalah GAMS, Vensim, dan PRIME. Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini merupakan perangkat lunak yang dipilih dari berbagai perangkat lunak yang tersedia. Studi literatur yang dilakukan terhadap beberapa perangkat lunak menghasilkan bahwa perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian mempunyai kemampuan yang lebih baik dibandingkan dengan perangkat lunak lainnya yang dipelajari. Metode pengembangan model dan perangkat lunak yang digunakan pada penelitian secara umum akan dibahas pada bagian berikut ini.

### 3.2.1. Model Optimasi yang Dikembangkan dengan Metode *Goal Programming*

Model optimasi dalam penelitian ini dikembangkan guna mencapai tujuan pertama penelitian, yaitu menganalisis jumlah optimal BBF yang dapat digunakan di DKI Jakarta sebagai sumber energi agar dampak deposisi asamnya minimal terhadap lingkungan. Tabel 11 memperlihatkan jenis data yang digunakan dalam model optimasi untuk menganalisis jumlah BBF optimal yang dapat digunakan sebagai sumber energi agar emisinya minimal. Emisi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> yang minimal berarti polusi deposisi asam yang dihasilkan juga akan minimal, demikian juga dampak negatifnya. Analisis dalam pengembangan model optimasi dilakukan dengan metode *Goal Programming*, menggunakan perangkat lunak GAMS atau *general algebraic modelling system* (Dellink, 2004 dan Rosenthal, 2007).

Tabel 11 Jenis data untuk analisis *Goal Programming*

Produk	X	$g^+$	$g^-$	Target	Satuan
Energi	.....	.....	.....	.....	kWh
SO <sub>2</sub>	.....	.....	.....	.....	Ton
NO <sub>2</sub>	.....	.....	.....	.....	Ton
Harga	.....	.....	.....	.....	Rupiah

Keterangan:

- Kolom X: menyatakan produksi energi sebesar 1 satuan (kWh) akan mengemisikan gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> sebesar X ton per tahun.

- Kolom  $g^+$ : merupakan surplus harga yang akan diperoleh jika produksi energi meningkat sebesar 1 satuan (kWh).
- Kolom  $g^-$ : adalah defisit biaya yang harus dikeluarkan untuk menurunkan polutan ( $SO_2$  dan  $NO_2$ ) sebesar 1 satuan (Ton).
- Target: energi minimal yang dibutuhkan penduduk dan BME polutan.
- Satuan: satuan produk (energi dan polutan) serta harganya.

Berdasarkan tabel tersebut dikembangkan persamaan matematik untuk mencari jumlah emisi maksimal berdasarkan rumus (2.15) sebagai berikut:

$$\text{Jumlah emisi maksimal} = \text{BME} + \text{surplus emisi} - \text{defisit energi} \dots\dots\dots (3.1)$$

Jumlah emisi maksimal dari persamaam (3.1) akan memberikan penalti minimal yang diturunkan dari rumus (2.16), yaitu:

$$\text{Penalti Minimal} = \text{Min} (\text{Vol. BBF}) * \text{Biaya per satuan energi} + \text{Biaya penalti kelebihan emisi} + \text{defisit energi} \dots\dots\dots (3.2)$$

Persamaan matematik yang dikembangkan lalu dioperasikan dengan menggunakan program komputer GAMS (Dellink, 2004 dan Rosenthal, 2007). Nilai-nilai dari data dalam Tabel 11 beserta persamaan matematiknya ditulis dalam bahasa pemrograman berupa 'input file', lalu di 'run' dengan GAMS. Hasil dari proses algoritmanya berupa 'file output' yang berisi nilai optimal dari parameter-parameter. Selanjutnya nilai-nilai tersebut digunakan dalam pengembangan model estimasi sebagai tahap kedua dari penelitian.

### 3.2.2. Model Estimasi yang Dikembangkan dengan Metode Simulasi Sistem Dinamik

Pengembangan model estimasi digunakan untuk mencapai tujuan kedua dari penelitian, yaitu menilai kerusakan lingkungan yang disebabkan oleh deposisi asam serta

memprediksi nilai kerusakan tersebut di masa yang akan datang. Metode simulasi sistem dinamik digunakan untuk pengembangan model estimasi dalam penelitian, dengan perangkat lunak Vensim (Pedercini, 2003 dan Repenning, 1998). Persamaan matematik dari model optimasi, yang menyatakan jumlah penggunaan optimal BBF terhadap terjadinya polusi deposisi asam diketahui melalui metode *Goal Programming*, sedangkan variabel dan parameter serta persamaan lain yang akan diterapkan dalam model estimasi diperoleh dari metode *Ordinary Least Square (OLS)*. Terdapat lima hal penting dari metode OLS yang secara khusus diperhatikan pada penelitian ini, yaitu (Levin dan Fox, 1996 dan Sarwoko, 2005):

1. Nilai standard deviasi (S): merupakan ukuran kesesuaian model regresi dengan perilaku data, makin kecil nilai S makin tepat estimasi model regresi yang dihasilkan dengan perilaku data sampel.
2. Nilai koefisien determinasi, yang dinyatakan sebagai (R-sq) atau  $R_i^2$  atau [R-sq(adj)]: merupakan ukuran sejauh mana kecocokan antara data dengan garis estimasi regresi. Makin tinggi nilai R-sq makin cocok antara model regresi dengan prediksi data populasi, dan nilai R-sq maksimum adalah 100%.
3. Nilai *Variance Inflation Factor (VIF)*: merupakan nilai hasil pengukuran multikolinearitas, untuk mendeteksi sejauh mana sebuah variabel independen dapat diterangkan oleh semua variabel independen lainnya yang terdapat di dalam persamaan regresi. Persamaan matematik yang digunakan untuk menghitung VIF untuk koefisien  $b_i$  adalah:

$$VIF(b_i) = \frac{1}{1 - R_i^2} \dots\dots\dots (3.3)$$

dimana:  $R_i^2$  adalah koefisien determinasi. Pada umumnya multikolinearitas dikatakan berat apabila nilai VIF dari suatu variabel melebihi 10.

4. Uji statistik Durbin-Watson (DW): merupakan uji yang digunakan untuk menentukan otokorelasi urutan pertama pada *error term* dari sebuah persamaan regresi. Persamaan matematik yang digunakan pada pengamatan ke t adalah:

$$DW = \frac{\sum_2^I (u_t - u_{t-1})^2}{\sum_1^I u_t^2} \dots\dots\dots (3.4)$$

dimana  $u_t$  adalah nilai-nilai residu OLS. Arti nilai statistik DW:

- DW = 0, jika terdapat otokorelasi ekstrim positif,
  - DW = 2, jika tidak terdapat otokorelasi, dan nilai DW di sekitar 2 merupakan nilai ideal,
  - DW = 4, jika terdapat otokorelasi ekstrim negatif.
5. Uji Cochrane-Orcutt: merupakan metode untuk menghilangkan otokorelasi urutan pertama pada sebuah estimasi persamaan regresi, dengan cara melakukan pengulangan atau iterasi untuk mendapatkan estimasi persamaan regresi yang tidak mengandung otokorelasi.

Hasil yang diperoleh dari model optimasi dan OLS berupa persamaan-persamaan matematik kemudian digunakan dalam simulasi sistem dinamik untuk mengembangkan model estimasi. Selain itu persamaan-persamaan hasil penelitian sebelumnya yang telah dijelaskan pada bab 2 (Tinjauan Pustaka) juga dipergunakan untuk mengembangkan model estimasi dengan metode simulasi sistem dinamik. Adakalanya persamaan yang diperoleh dari penelitian terdahulu perlu dilakukan modifikasi sebelum digunakan dalam simulasi sistem dinamik.

Pada simulasi sistem dinamik yang dirancang dalam bentuk diagram *stock-flow* terlihat bahwa konsumsi BBF yang dibutuhkan oleh populasi di provinsi DKI Jakarta akan mengemisikan polutan, yaitu gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>. Emisi polutan ini akan mempengaruhi konsentrasi udara ambien, yang akan menyebabkan degradasi lingkungan dan adanya penduduk yang terpapar. Kerugian dari degradasi lingkungan dan paparan terhadap penduduk ini dinyatakan sebagai biaya kesehatan dan lingkungan, yang harus diperhitungkan dalam manfaat bersih penggunaan BBF sebagai sumber energi.

### 3.2.3. Model Alternatif Kebijakan yang Dikembangkan dengan Metode Analisis Multi Kriteria

Tahap pertama dan kedua dari penelitian menghasilkan model optimasi dan estimasi yang bersifat kuantitatif dan dinamik. Hasil tersebut dapat digunakan sebagai dasar pembuatan beberapa skenario untuk berbagai alternatif kebijakan yang akan diambil. Sebelum menentukan skenario mengenai kebijakan polusi deposisi asam, maka perlu ditentukan terlebih dahulu skenario kebijakan mengenai basis pembangunan yang akan diterapkan. Skenario dikembangkan berdasarkan implikasi terhadap kondisi lingkungan, ekonomi dan sosial yang akan muncul jika ketiga jenis kebijakan mengenai basis pembangunan sehubungan dengan adanya polusi deposisi asam diterapkan. Ketiga skenario tersebut adalah: pembangunan berlangsung seperti sekarang (*business as usual* = *BAU* atau kondisi status quo), atau kebijakan pembangunan yang berbasis ekonomi (*economic driven* = *EC-D*), atau kebijakan pembangunan yang berlandaskan kaidah lingkungan (*environmental driven* = *EN-D*).

Masing-masing skenario atau alternatif ditetapkan kriteria dan bobotnya, sehingga dapat dilakukan analisis multi kriteria untuk menentukan alternatif mana yang sebaiknya diambil oleh pengambil keputusan. Analisis terhadap skenario dan pembobotannya dilakukan dengan program komputer PRIME atau *preference ratios in multiattribute evaluation* (Salo dan Hämäläinen, 2001), hasilnya berupa urutan prioritas skenario yang disarankan untuk diimplementasikan. Pada PRIME preferensi dinyatakan dalam bentuk interval yang digunakan untuk menentulan pilihan (*elicitation*) manakala informasi tidak lengkap (*incomplete*) melalui *interval-valued ratio* (Gustafsson *et al.*, 2001 serta Salo dan Hämäläinen, 2001).

### 3.3. Tempat, Bahan dan Waktu Penelitian

Penelitian mengenai pencemaran deposisi asam dalam disertasi ini mengambil provinsi DKI Jakarta sebagai wilayah yang diteliti. Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah seperangkat data mengenai kondisi sosial demografi DKI Jakarta yang diperoleh dari BPS (Badan Pusat Statistik), baik BPS Pusat maupun BPS Provinsi DKI

Jakarta. Data mengenai faktor iklim dan konsentrasi pencemar udara di Jakarta diperoleh dari BMG (Badan Meteorologi dan Geofisika), dan BPLHD atau Bapedalda (Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Daerah) di Jakarta. Data jumlah dan jenis kendaraan didapatkan dari Badan Pembinaan Keamanan Direktorat Lalu Lintas, Kepolisian Negara Republik Indonesia (Ditlantas Polri).

Data kualitas udara, berupa konsentrasi ambien pencemar, yang dianalisis pada penelitian ini merupakan data sekunder tahunan, meskipun pengukuran yang dilakukan oleh BMG dan BPLHD dilaksanakan secara terus-menerus setiap hari. Hal ini sesuai dengan pernyataan Soedomo (2001) bahwa analisis terhadap kualitas udara sebaiknya dilakukan melalui data tahunan dalam jangka waktu yang cukup lama. Hanya dengan menggunakan data sekunder dalam periode pengamatan yang cukup panjang, penyimpulan mengenai keadaan kualitas udara di suatu tempat dapat dilakukan secara ilmiah. Meskipun data primer yang digunakan, tetapi jika pengambilan sampel hanya dilakukan sesaat, maka kesimpulan yang diperoleh hanya dapat digunakan sebagai gambaran indikatif yang sifatnya umum sekali. Hal ini disebabkan karena perilaku variasi unsur pencemar udara sangat dinamis terhadap ruang dan waktu.

Penelitian pengembangan model kebijakan ini berlangsung selama 20 bulan, dimulai dari bulan Desember 2005 sampai dengan Juli 2007. Namun demikian penulisan laporan penelitian dalam bentuk disertasi ternyata memerlukan waktu yang cukup panjang, yaitu sekitar 5 bulan, sehingga hasil penelitian ini baru dapat diseminarkan pada awal Desember 2007.

#### IV. ASUMSI DAN PENGEMBANGAN MODEL

Berdasarkan kerangka pemikiran dan peta penelitian yang menjadi acuan dalam penelitian, diketahui variabel-variabel yang diperlukan dalam pengembangan model. Data dari variabel terkait dikumpulkan dari berbagai sumber, seperti dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12 Jenis dan sumber data yang digunakan dalam penelitian

No	Data	Sumber
1	Jumlah Penduduk	Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi DKI Jakarta
2	Produk Domestik Regional Bruto (PDRB)	Buku Jakarta Dalam Angka, BPS
3	Jumlah Kendaraan	Kepolisian Negara Republik Indonesia: Badan Pembinaan Keamanan Direktorat Lalu Lintas (Ditlantas Polri)
4	Penjualan BBM	Buku Jakarta Dalam Angka, BPS Provinsi DKI Jakarta
5	Produksi Listrik	Buku Jakarta Dalam Angka, BPS Provinsi DKI Jakarta
6	Konsentrasi Udara Ambien gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub>	Badan Meteorologi dan Geofisika (BMG)
7	Curah Hujan	Badan Meteorologi dan Geofisika (BMG)
8	Temperatur (Suhu)	Badan Meteorologi dan Geofisika (BMG)
9	Baku Mutu Udara Ambien (BMA) dan Baku Mutu Emisi (BME) untuk gas SO <sub>2</sub> dan NO <sub>2</sub>	Kebijakan-kebijakan yang dikeluarkan oleh Pemerintah DKI Jakarta

Asumsi umum yang digunakan dalam pengembangan model akan dibahas pada sub-bab berikut, sedangkan asumsi-asumsi yang lebih spesifik akan dijelaskan pada saat akan digunakan dalam setiap tahap pengembangan model.

#### 4.1. Asumsi Umum

Asumsi umum pertama dalam penelitian ini adalah mengenai penyebab terjadinya deposisi asam. Polusi deposisi asam yang berasal dari gas-gas  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$  di atmosfer diawali dari emisi akibat berbagai aktifitas alamiah dan kegiatan manusia (antropogenik). Aktivitas alamiah yang mengemisikan gas-gas  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$  adalah aktifitas gunung berapi dan kilat, serta senyawa Sulfur yang diemisikan dari tumbuhan. Sedangkan kegiatan manusia yang menghasilkan gas-gas  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$  berupa pembakaran bahan bakar fosil (BBF), proses penambangan Cu (tembaga), dan pembakaran sisa panen. Dalam penelitian ini sumber emisi gas-gas tersebut dibatasi hanya berdasarkan hasil pembakaran BBF sebagai sumber energi. Asumsi ini diambil berdasarkan Howells (1995) yang menyatakan bahwa lebih dari 90% gas-gas  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$  yang terdapat di udara merupakan hasil kegiatan manusia, dan sebagian besar dihasilkan dari pembakaran BBF.

Pada penelitian ini kerusakan lingkungan akibat deposisi asam yang diperhitungkan secara detail hanya yang berasal dari penurunan kualitas kesehatan manusia. Sedangkan kerusakan terhadap bangunan, tanaman, dan hewan tidak akan diperhitungkan secara terperinci, karena berdasarkan penelitian Nakada dan Pearce (1998) seperti yang tertera pada Tabel 7 nilai ekonomi kerusakan bangunan, tanaman, hutan, dan air jumlahnya jauh lebih kecil dibandingkan terhadap kesehatan manusia. Dalam penelitian ini nilai kerusakan lingkungan akibat polusi deposisi asam terhadap faktor-faktor lain, selain kesehatan manusia, diperhitungkan sebagai biaya degradasi lingkungan akibat hujan asam.

Terdapat 2 asumsi umum lainnya yang digunakan dalam penelitian untuk menghitung biaya kerusakan lingkungan yang diakibatkan oleh pencemaran deposisi asam, yang diadopsi dari Nakada dan Pearce (1998), yaitu:

1. Kerusakan karena terjadinya degradasi lingkungan dan penurunan tingkat kesehatan manusia hanya didasarkan pada deposisi tahunan (*annual deposition*) gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$ , dan dianggap tidak terjadi dampak kumulatif dari deposisi Sulfur maupun Nitrogen pada reseptor.
2. Satuan biaya kerusakan yang diakibatkan oleh tiap ton emisi  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  adalah konstan.

Asumsi pertama dalam penghitungan biaya dapat menimbulkan perdebatan, sebab menurut Baum (2001) dan Soemarwoto (2004) deposisi Sulfur dan Nitrogen dapat menimbulkan efek yang serius dan kumulatif terhadap lingkungan alamiah. Asumsi tersebut juga mengindikasikan tidak adanya efek pada konsentrasi di bawah BMA, yaitu konsentrasi dimana dianggap tidak ada kerusakan yang terjadi. Padahal dampak kumulatif dari gas-gas penyebab deposisi asam banyak diperdebatkan. Asumsi kedua menyatakan seolah-olah tidak terjadi kemajuan teknologi dalam proses abatemen polusi deposisi asam, kenyataannya telah banyak teknologi dan metodologi yang berkembang dalam upaya mengatasi polusi ini.

Pengembangan model pada penelitian ini dilaksanakan berdasarkan asumsi-asumsi umum di atas dan kerangka pemikiran serta peta penelitian yang telah dijelaskan pada bab 3 mengenai Metode Penelitian. Terdapat 3 model dasar yang dikembangkan, yaitu:

1. Model optimasi, dengan menggunakan metode *goal programming* (GP),
2. Model estimasi, dengan menggunakan metode simulasi sistem dinamik,
3. Model alternatif kebijakan, dengan menggunakan metode analisis multi kriteria.

Pengembangan model dilaksanakan dengan menggunakan data sekunder seperti yang tertera pada Lampiran 1. Data sekunder pada penelitian ini merupakan data runtut waktu (*time series*) mulai tahun 1993 sampai dengan 2004, dengan mengabaikan data tahun 1998. Karena pada tahun 1998 terjadi krisis nasional, sehingga data yang diperoleh merupakan data pencilan.

Selain menggunakan data tersebut, pengembangan model juga didasarkan atas faktor-faktor konversi, serta data berbagai hasil penelitian terdahulu baik dari dalam maupun luar negeri, yang akan disebutkan sumbernya setiap kali digunakan. Adakalanya data hasil penelitian sebelumnya perlu dimodifikasi atau dikonversi sebelum digunakan.

## 4.2. Pengembangan Model Optimasi

Seperti yang telah dijabarkan pada bab 3 tentang Metode Penelitian, langkah awal yang dilakukan untuk mengembangkan model optimasi dengan metode GP (*goal programming*) adalah mengisi data pada matriks berikut:

Tabel 13 Matriks data sebagai acuan model optimasi

Produk	X	$g_1$	$g_2$	$g_3$	Target	Satuan
Energi	1	1	0	0	50.6914519	MkWh
SO <sub>2</sub>	15279628	0	-1	0	1058432	Ton
NO <sub>2</sub>	16030914	0	0	-1	1323040	Ton
Harga		495000	$8.25 \cdot 10^{-6}$	$17.23 \cdot 10^{-6}$		Juta Rupiah

Keterangan tabel:

1. Produk (X) : Energi sebesar 1 Milyar kWh (MkWh) akan mengemisikan gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> sebesar X ton per tahun
2. Target : Energi yang dibutuhkan penduduk DKI Jakarta pada kondisi ideal dan BME (Baku Mutu Emisi) gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> per tahun
  - Energi dihitung dari jumlah penduduk DKI dikalikan kebutuhan energi rata-rata (*Indonesia Energy Outlook and Statistics, 2004*). Hasil perhitungannya adalah penduduk DKI Jakarta rata-rata membutuhkan energi listrik sebesar 0,005-0,007 kWh per jiwa.
  - BME polutan yang berupa gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> dihitung berdasarkan Keputusan Gubernur DKI No 670 tahun 2000 dikalikan dengan volume udara Provinsi DKI Jakarta
3. Harga : menyatakan harga tiap penambahan satuan energi (MkWh), dan biaya pengurangan polutan per ton per tahun
  - Harga energi 1 MkWh ditentukan berdasarkan Keputusan Presiden RI nomor 104 tahun 2003.
  - Biaya abatemen polutan di konversi dari Belanda, Jerman, dan Jepang (Dellink, 2004 dan Oka *et al.*, 2005)

Nilai-nilai pada matriks tersebut diolah dengan menggunakan perangkat lunak GAMS (*general algebraic modelling system*) untuk memperoleh nilai optimal dari energi yang dapat digunakan dengan emisi polutan dibawah nilai BME. Karena GAMS merupakan bahasa pemrograman, maka untuk menggunakannya diperlukan penulisan program sebagai *input file*, dengan memasukan nilai-nilai pada matriks data beserta persamaan matematikanya.

*Input file* diolah dengan perangkat lunak GAMS, dan hasil pengolahannya berupa *output file*, yang dapat dilihat pada Lampiran 2. Hasil pengolahan GAMS menyatakan bahwa total biaya penalti yang harus dibayarkan adalah Rp.2007,635 Juta atau sekitar Rp.2,008 Milyar, untuk menghasilkan energi bagi penduduk DKI Jakarta sebesar 50,691 Milyar kWh. Biaya penalti ini dihitung berdasarkan biaya abatemen yang harus dikeluarkan agar emisi polutan berupa gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> yang menyertai produksi dan penggunaan energi tidak melebihi BME yang telah ditetapkan.

Hasil pengolahan tersebut dianggap sebagai kondisi sekarang atau skenario status quo (BAU = *bussiness as usual*). Pengembangan selanjutnya dari model optimasi dilakukan dengan mengubah nilai-nilai dari parameter ekonomi (harga listrik dan biaya abatemen) dan parameter standar lingkungan (BME). Pengolahan model optimasi menggunakan perangkat lunak GAMS kembali dilaksanakan setiap kali dilakukan perubahan terhadap nilai dari parameter ekonomi dan lingkungan. Perubahan berbagai nilai tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 14 Matriks perubahan nilai dalam model optimasi

skenario	harga listrik	biaya abatemen SO <sub>2</sub>	biaya abatemen NO <sub>2</sub>	BME SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	BME NO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )
BAU (kondisi awal)	495000	8.25 *10 <sup>-6</sup>	17.23*10 <sup>-6</sup>	800	1000
perubahan harga listrik	635000	8.25 *10 <sup>-6</sup>	17.23*10 <sup>-6</sup>	800	1000
perubahan harga abatemen	495000	6.74 *10 <sup>-6</sup>	14.08*10 <sup>-6</sup>	800	1000
perubahan BME	495000	8.25 *10 <sup>-6</sup>	17.23*10 <sup>-6</sup>	600	800

Perubahan terhadap harga listrik dari kondisi awal dilakukan berdasarkan asumsi akan adanya kenaikan harga listrik, namun demikian nilainya tetap mengambil harga listrik tertinggi yang terdapat pada Keputusan Presiden RI nomor 104 tahun 2003. Konversi harga abatemen polutan yang diperoleh dari berbagai negara diturunkan dengan asumsi adanya kemajuan teknologi yang akan menurunkan biaya abatemen.

Nilai-nilai yang terdapat pada ke empat skenario di atas kembali diolah dengan metoda *Goal Programming* (GAMS), dan hasil pengolahannya diletakan pada Lampiran 3. Selanjutnya analisis terhadap hasil pengolahan tersebut akan dibahas pada bab 5.

### **4.3. Pengembangan Model Estimasi**

Dua tahap penting dalam pengembangan model estimasi dengan simulasi sistem dinamik akan dibahas pada sub-bab ini, yaitu tahap identifikasi model dan tahap simulasi serta analisis sensitivitas model. Sebelum mengembangkan model simulasi dinamik, maka perlu dilakukan identifikasi secara statistik terhadap variabel-variabel yang dianggap berpengaruh serta besarnya parameter pada fungsi atau persamaan yang dihasilkan. Setelah persamaan diketahui, maka ditentukan satuan dari tiap-tiap variabel beserta faktor konversinya agar persamaan matematik yang dihasilkan dapat diimplementasikan dalam model estimasi melalui simulasi sistem dinamik.

#### **4.3.1. Identifikasi Model Dalam Simulasi Sistem Dinamik**

Terdapat 2 langkah identifikasi dalam menentukan model simulasi sistem dinamik, yaitu melakukan identifikasi variabel dari data sekunder dan identifikasi persamaan dari hasil penelitian sebelumnya. Langkah awal yang dilakukan dalam membangun model adalah menentukan variabel-variabel yang berpengaruh pada model serta mencari parameter dari data sekunder yang diperoleh. Langkah berikutnya adalah menentukan persamaan-persamaan dari hasil penelitian-penelitian terdahulu untuk dimasukkan dalam model. Dalam penelitian ini proses identifikasi variabel dari data sekunder dilaksanakan secara statistik dengan bantuan perangkat lunak SPSS, Minitab dan Shazam, yang akan dijelaskan pada bagian berikut.

#### 4.3.1.1. Identifikasi Variabel dari Data Sekunder

Pengembangan model estimasi nilai kerusakan polusi deposisi asam diawali dengan menentukan variabel apa saja yang mempengaruhi konsentrasi ambien dari pencemar yang berupa gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$ . Setelah melakukan studi pustaka dan menganalisis kondisi eksisting pada wilayah penelitian, maka variabel-variabel yang dianggap mempengaruhi konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  adalah:

1. Jumlah penduduk DKI Jakarta, dinyatakan dengan variabel penduduk dalam satuan juta jiwa.
2. Besarnya pendapatan penduduk per tahun, dinyatakan dengan variabel PDRB (produk domestik regional bruto) dalam satuan Triliun Rupiah.
3. Jumlah kendaraan di DKI Jakarta, dinyatakan dengan variabel kendaraan atau mobil dalam satuan juta buah.
4. Volume penjualan bahan bakar minyak (BBM) yang dinyatakan dengan variabel BBM dalam satuan Milyar Liter.
5. Produksi listrik yang dinyatakan dengan variabel listrik dalam satuan Milyar KWh.
6. Jumlah curah hujan yang dinyatakan dengan variabel hujan dalam satuan ribu mm.
7. Temperatur udara rata-rata yang dinyatakan dengan variabel suhu dalam satuan derajat Celcius.

Ke tujuh variabel yang diduga akan mempengaruhi konsentrasi ambien kedua gas pencemar di udara diidentifikasi secara statistik, dengan mengasumsikan bahwa pengaruh variabel-variabel tersebut merupakan fungsi linier, yang dapat dinyatakan dengan persamaan regresi. Proses identifikasi ke tujuh variabel yang dianggap mempengaruhi konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  dapat dilihat pada Lampiran 4, dan hasilnya adalah variabel yang mempengaruhi konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$  di udara dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Konsentrasi Ambien } SO_2 = & -0.0021753 + 2.0710 \text{ penddk\_t} + 0.16040 \text{ pdrb\_t} + \\ & 1.3461 \text{ bbm\_t} + 1.2540 \text{ listrik\_t} + 0.83158 \text{ hujan\_t} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

Sedangkan variabel-variabel yang mempengaruhi konsentrasi ambien gas NO<sub>2</sub> di udara dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \text{Konsentrasi Ambien } NO_2 = & -0.17019 + 0.019162 \text{ penduduk} + 0.033731 \text{ pdrb\_n} + \\ & 0.46410 \text{ mobil\_n} + 0.038314 \text{ listrik\_n} + 0.81404 \text{ hujan\_n} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

Persamaan 4.1 dan 4.2 digunakan pada model simulasi sistem dinamik dalam bentuk variabel dan konstanta yang menjadi bagian dari diagram stok-flow. Diantara variabel-variabel tersebut dalam diagram stok-flow variabel penduduk memiliki persamaan (Fauzi, 2004):

$$P_t = r P \left( 1 - \frac{P}{cc} \right) \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

dimana:

- P<sub>t</sub> = Jumlah penduduk pada tahun t
- P = Jumlah penduduk awal
- r = laju pertumbuhan penduduk
- cc = batas maksimal jumlah penduduk (*carrying capacity*), dalam penelitian ini cc penduduk DKI Jakarta diasumsikan sebesar 20 juta

Sedangkan persamaan yang berasal dari hasil penelitian-penelitian terdahulu juga akan menjadi bagian dari diagram stok-flow, seperti penjelasan berikut.

#### 4.3.1.2. Identifikasi Persamaan dari Hasil Penelitian Sebelumnya

Berikut ini dijabarkan berbagai persamaan yang digunakan untuk mengembangkan model simulasi sistem dinamik. Pengembangan model diawali dengan mengidentifikasi persamaan pertumbuhan penduduk, yang merupakan penjumlahan dari kelahiran dan migrasi dikurangi jumlah penduduk yang meninggal. Namun data

mengenai kelahiran, migrasi dan kematian tidak diperoleh, karena itu digunakan data rata-rata pertumbuhan penduduk tahunan. Hasil perhitungan terhadap data penduduk DKI yang ada menyatakan bahwa rata-rata pertumbuhan penduduk tahunan adalah 0,004. Variabel-variabel lain yang dianggap mempengaruhi konsentrasi ambien polutan dihitung rata-rata pertumbuhannya, hasilnya dapat dilihat pada Lampiran 5.

Menurut Olsthoorn *et al.* (1999) konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> akan berubah menjadi konsentrasi sulfat dan ammonium nitrat yang merupakan bagian dari senyawa *secondary* PM<sub>10</sub> dan dinyatakan dengan persamaan berikut (dimodifikasi dari persamaan 2.6):

$$\begin{aligned} [\text{Sulfat}] &= 0,073/2612,24 * [\text{SO}_2]^{0,57} * 100/86 \\ [\text{Amonium nitrat}] &= 0,377/1877,55 * [\text{NO}_2]^{0,63} * 100/89 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

dimana:

[Sulfat]	= konsentrasi sulfat (µg.m <sup>-3</sup> )
[SO <sub>2</sub> ]	= konsentrasi SO <sub>2</sub> (µg.m <sup>-3</sup> )
[Amonium nitrat]	= konsentrasi amonium (µg.m <sup>-3</sup> )
[NO <sub>2</sub> ]	= konsentrasi NO <sub>2</sub> (µg.m <sup>-3</sup> )
2612,24	= faktor konversi konsentrasi SO <sub>2</sub> dari ppm ke µg/m <sup>3</sup>
1877,55	= faktor konversi konsentrasi NO <sub>2</sub> dari ppm ke µg/m <sup>3</sup>

Kedua angka faktor konversi tersebut dihitung berdasarkan rumus yang dikemukakan oleh Soedomo (2001) :

$$ppm = \frac{(\mu\text{g} / \text{m}^3) * 24,5 * 10^{-3}}{M} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

dimana M adalah berat molekul senyawa atau unsur pencemar udara.

Menurut Howells (1995) sekitar 90% emisi gas penyebab pencemaran deposisi asam dihasilkan secara antropogenik, dimana 1-5% emisi SO<sub>x</sub> dan 11% emisi NO<sub>x</sub> dihasilkan secara alamiah. Karena dalam penelitian ini yang ditinjau hanya gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> yang berasal dari kegiatan antropogenik, maka dalam penghitungan konsentrasi ambien kedua gas tersebut untuk SO<sub>2</sub> dikurangi 5%, sedangkan NO<sub>2</sub> dikurangi 11%.

Tidak selamanya konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> akan terakumulasi di udara, melainkan akan berkurang dengan waktu. Pengurangan konsentrasi ambien ini

dinyatakan dengan waktu paruh (*half-life*), yaitu waktu yang dibutuhkan suatu zat untuk mengurangi konsentrasi sampai setengah dari konsentrasi awalnya (Brady, 1990). Itulah sebabnya pada model simulasi sistem dinamis yang dikembangkan dalam penelitian ini terdapat 2 nilai konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>. Konsentrasi ambien yang kedua merupakan variabel konsentrasi polutan di udara ambien yang telah memperhitungkan adanya waktu paruh.

Menurut Schnelle dan Dey (2000) konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> di udara memiliki waktu paruh 4 jam sedangkan menurut Hoffert (1972) 56,57 hari. Dengan rentangan waktu paruh yang demikian besar, maka dalam model dinamik yang dikembangkan dicari nilai yang terbaik dan hasilnya adalah 26 hari. Ternyata nilai ini sesuai dengan waktu paruh gas SO<sub>2</sub> yang dinyatakan oleh Chang dan England (2005). Sedangkan waktu paruh untuk gs NO<sub>2</sub> di udara ambien menurut NEPC (2006) adalah 50 hari.

Untuk mengetahui jumlah populasi yang terpapar oleh kedua polutan digunakan asumsi bahwa persentasi penduduk Jakarta yang akan mengalami gangguan kesehatan karena polusi udara adalah 12,6% (Ostro, 1994). Dalam model ini angka tersebut dinyatakan sebagai variabel proporsi penduduk terpapar. Berbagai jenis gangguan kesehatan yang diakibatkan oleh kedua polutan tersebut mengikuti persamaan matematik berikut:

1. Kasus kesehatan akibat polusi gas SO<sub>2</sub> di udara ambien:

a. Mortalitas prematur:

$$NP(t) = 0,002 * \left[ \frac{SO_2(t) - SO_{2st}}{SO_{2st}} \right] * P(t) * CM(t) \text{ untuk } SO_2(t) > SO_{2st} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

dimana:

NP(t) : jumlah penduduk yang meninggal akibat polusi gas SO<sub>2</sub> pada tahun ke-t

SO<sub>2</sub>(t) : konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) pada tahun ke-t

SO<sub>2st</sub> : konsentrasi baku mutu udara ambien (BMA) SO<sub>2</sub> per tahun

P(t) : jumlah populasi pada tahun ke-t

CM(t) : laju mortalitas kasar penduduk pada tahun ke-t, pada penelitian ini CM(2000) untuk provinsi DKI Jakarta = 0,0035 (BPS, Bappenas, dan UNFPA Indonesia, 2005)

Nilai VOSL (*value of statistical life*) pada tahun 2000 yang dinyatakan oleh Susandi (2004) sebesar US\$144.000, dan dihitung berdasarkan kurs mata uang asing serta tingkat inflasi, nilainya setara dengan Rp.1.351.440.000,00

- b. Penyakit pernafasan (*LRI = lower respiratory illnesses*) pada anak:

$$NLRI(t) = 0,0001 * \left[ \frac{SO_2(t) - SO_{2st}}{SO_{2st}} \right] * PrC(t) * P(t) \text{ untuk } SO_2(t) > SO_{2st} \dots\dots\dots (4.7)$$

dimana:

NLRI(t) : jumlah penderita LRI pada tahun ke-t

PrC(t) : persentase anak-anak yang berusia dibawah 14 tahun di DKI Jakarta (BPS, Bappenas, dan UNFPA Indonesia, 2005), yang pada tahun 2000 = 26,9%, dalam model dinyatakan sebagai variabel proporsi anak-anak.

- c. Sesak nafas pada orang dewasa (*CDA = chest discomfort among adults*):

$$NCDA(t) = 0,00005 * \left[ \frac{SO_2(t) - SO_{2st}}{SO_{2st}} \right] * PrA(t) * P(t) \text{ untuk } SO_2(t) > SO_{2st} \dots\dots\dots (4.8)$$

dimana:

NCDA(t) : jumlah penderita CDA pada tahun ke-t

PrA(t) : persentase orang dewasa di Indonesia (BPS, Bappenas, dan UNFPA Indonesia, 2005), yang pada tahun 2000 = 100% - PrC(t) = 100% - 26,9% = 73,1%, dalam model dinyatakan sebagai variabel proporsi orang dewasa (prop dewasa).

2. Kasus kesehatan akibat polusi gas  $NO_2$  di udara ambien, berupa gangguan pernafasan (*RSD = respiratory symptoms disease*), yang dimodifikasi dari persamaan (2.11):

$$NRSD(t) = 6,02 * \left[ \frac{NO_2(t) - NO_{2st}}{NO_{2st}} \right] * PrA(t) * P(t) / 1877,55 \dots\dots\dots (4.9)$$

dimana:

- NRSD(t) : jumlah penderita RSD pada tahun ke-t  
 $NO_2(t)$  : konsentrasi gas  $NO_2$  (ppm) pada tahun ke-t  
 $NO_{2st}$  : Baku Mutu Ambien (BMA) konsentrasi  $NO_2$  per tahun

Konstanta-konstanta yang terdapat dalam persamaan (4.6) sampai dengan (4.9) merupakan faktor koreksi yang diperoleh dari penelitian Ostro (1994), dan besarnya tidak sama dengan konstanta yang dinyatakan Susandi (2004) pada persamaan (2.8) sampai dengan (2.11) di Bab 2 mengenai Tinjauan Pustaka. Karena penelitian Susandi (2004) mengacu pada nilai tengah dari penelitian Ostro (1994), sedangkan pada penelitian ini konstanta yang lebih tepat diperoleh dengan menggunakan nilai terendah hasil penelitian Ostro (1994).

Data statistik kesehatan yang dipublikasikan BPS (2005) menyatakan bahwa biaya rawat jalan di fasilitas kesehatan DKI Jakarta rata-rata adalah Rp.36.506,17 dan biaya rawat inap Rp.49.831,60 per hari. Dalam pengembangan model estimasi ini biaya rawat jalan dibulatkan menjadi Rp.37.000,00 dan biaya rawat inap Rp.50.000,00 per hari. Data BPS (2006) menyatakan bahwa rata-rata lamanya orang sakit dalam 1 tahun adalah 20 hari. Dengan asumsi bahwa penyakit yang berhubungan pernafasan rata-rata belum membutuhkan perawatan pada 5 hari pertama dan membutuhkan 10 kali rawat jalan serta 5 hari rawat inap, maka biaya untuk mengobati tiap orang yang menderita penyakit pernafasan diasumsikan sebesar Rp.620.000,00 dalam setahun.

Guna mengetahui seberapa besar degradasi lingkungan yang diakibatkan oleh meningkatnya konsentrasi ambien kedua pencemar udara digunakan persamaan laju degradasi yang dimodifikasi dari persamaan matematik (2.1):

$$\mu = 1 / \left( 1 + e^{\frac{-hat}{hst}} \right) \dots\dots\dots (4.10)$$

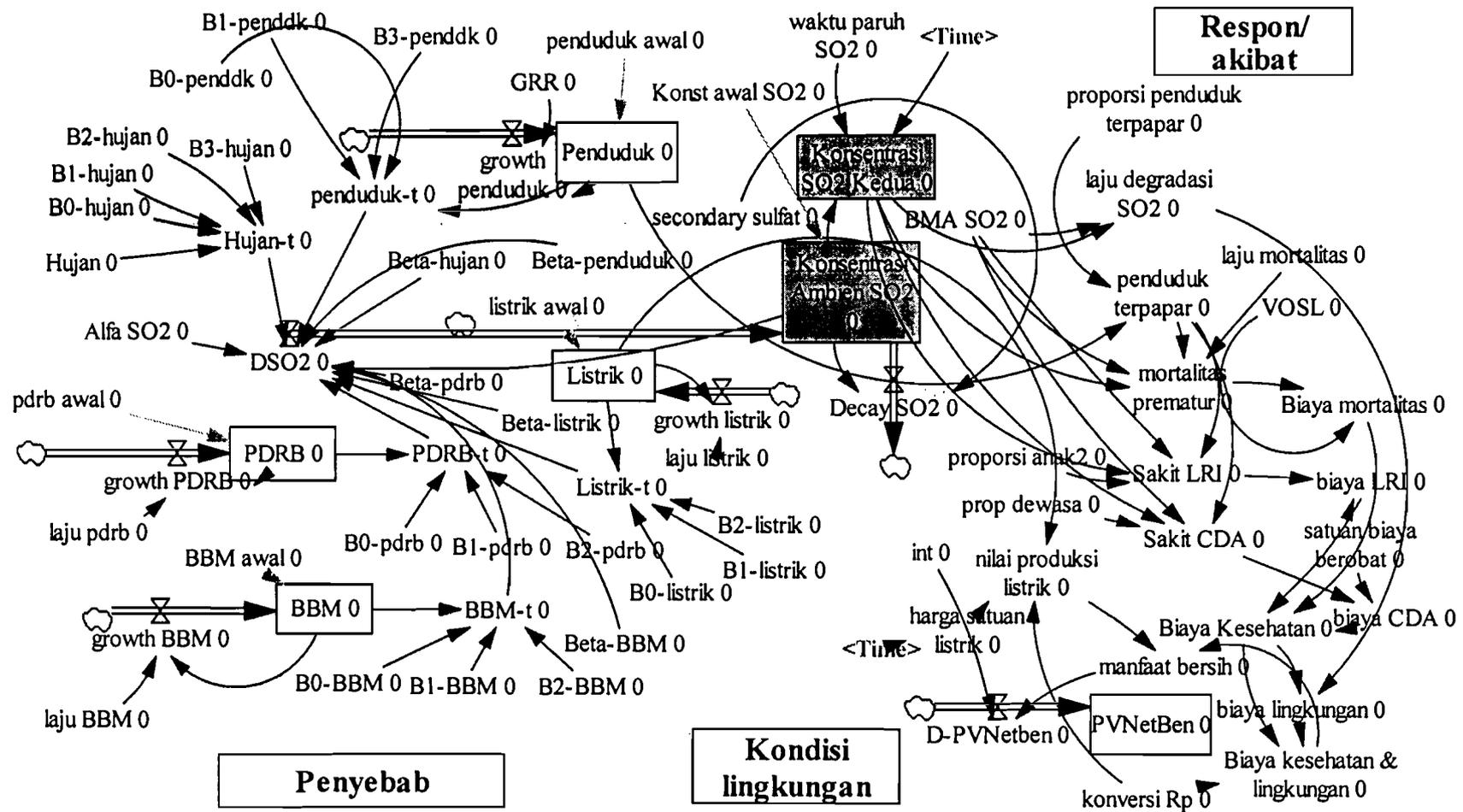
dimana:

- $\mu$  = laju degradasi  
 $hat$  = konsentrasi polutan di udara ambien pada periode t  
 $hst$  = Baku Mutu Ambien (BMA) polutan yang didasarkan pada Keputusan Gubernur DKI No 551 tahun 2001

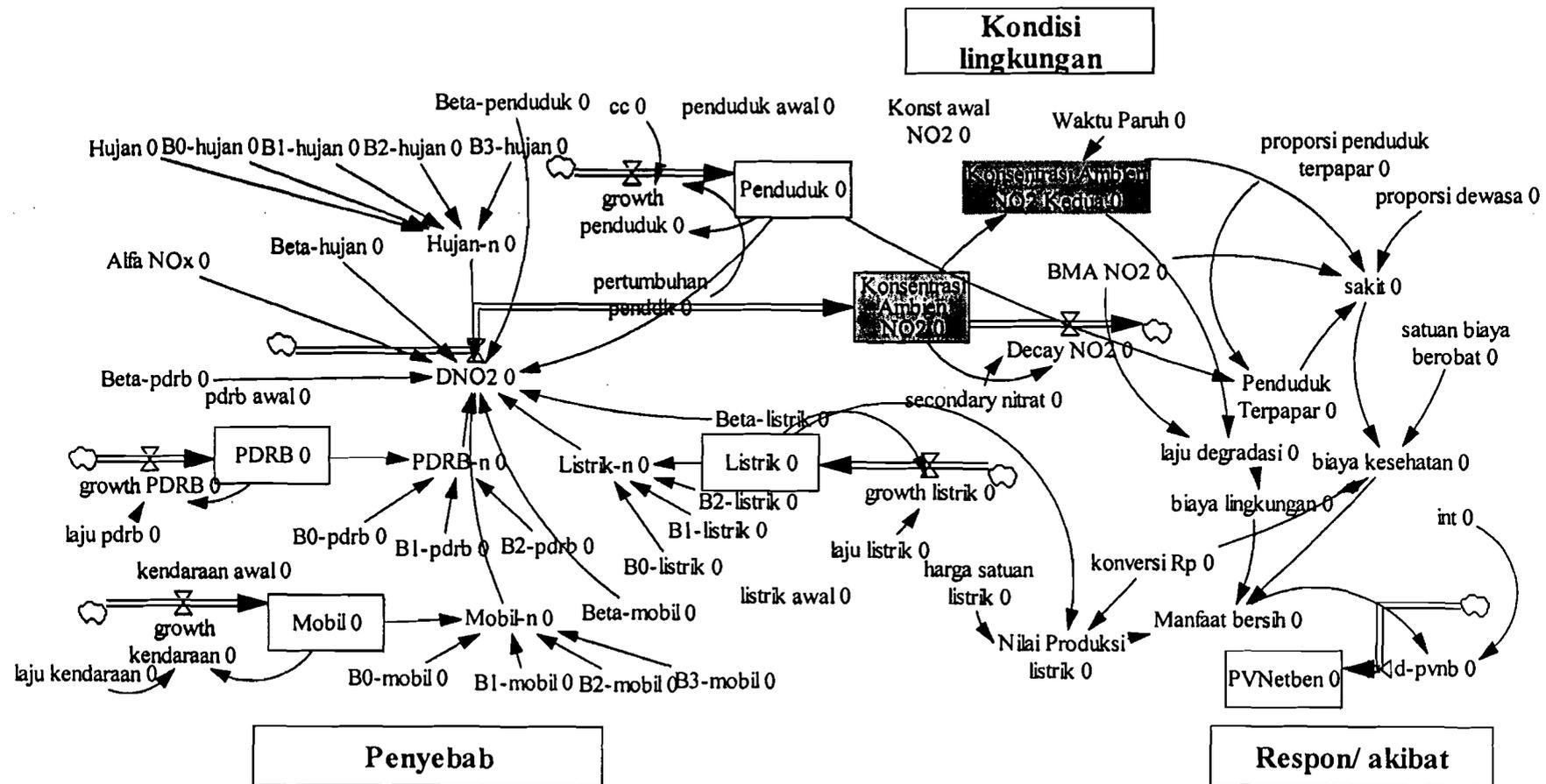
Nakada dan Pearce (1998) juga Menz dan Seip (2004) telah menghitung bahwa tiap ton gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> memiliki nilai kerusakan lingkungan yang berupa bangunan, tanaman, hutan, dan air sebagai akibat adanya deposisi asam. Kerusakan lingkungan tersebut besarnya sekitar 11% dari nilai penurunan kesehatan manusia serta berkurangnya aktivitas akibat meningkatnya konsentrasi gas penyebab pencemaran deposisi asam. Biaya yang dikeluarkan akibat adanya kerusakan lingkungan akibat pencemaran udara pada model simulasi dinamik dinyatakan sebagai variabel biaya lingkungan. Besarnya biaya lingkungan diasumsikan merupakan perkalian dari laju degradasi dengan 11% biaya kesehatan.

Biaya kesehatan dan lingkungan yang harus dibayar oleh masyarakat selama ini belum diperhitungkan terhadap nilai energi yang diperoleh. Dalam model estimasi pada penelitian ini, nilai energi diwakili oleh nilai jual listrik yang diproduksi untuk provinsi DKI Jakarta. Harga 1 kWh listrik ditentukan berdasarkan Keputusan Presiden RI nomor 104 tahun 2003 adalah Rp 495,-. Besarnya harga listrik ini digunakan untuk menghitung manfaat dari listrik yang diproduksi untuk wilayah DKI Jakarta. Karena produksi listrik dalam model simulasi dinamik ini menggunakan satuan Milyar kWh, maka harga listrik =  $Rp.495 \cdot 10^9$ .

Seluruh persamaan yang telah dijelaskan di atas disusun menjadi diagram stok flow untuk kedua jenis pencemar udara, seperti terlihat pada Gambar 5 dan 6. Sedangkan algoritma dari masing-masing sub-model dapat dilihat pada Lampiran 6 dan 7. Kedua sub-model simulasi sistem dinamis yang dikembangkan tersebut sudah dapat di-run, dan hasil simulasinya dapat dilihat pada Lampiran 8 dan 9.



Gambar 5 Diagram stok-flow simulasi sistem dinamik sub-model pencemaran gas SO<sub>2</sub>



Gambar 6 Diagram stok-flow simulasi sistem dinamik sub-model pencemaran gas  $\text{NO}_2$

### 4.3.2. Validasi dan Analisis Sensitivitas Terhadap Model Estimasi

Untuk meninjau seberapa valid kinerja kedua sub-model dan seberapa sensitif sub-model yang telah dikembangkan terhadap perubahan parameter, maka perlu dilakukan uji validitas dan analisis sensitivitas terhadap kedua sub-model estimasi yang dikembangkan dengan metode simulasi sistem dinamik, dan hal itu akan dibahas pada sub-bab ini.

#### 4.3.2.1. Uji Validitas

Kinerja kedua sub-model simulasi sistem dinamik yang telah dikembangkan perlu divalidasi untuk memperoleh keyakinan sejauh mana output yang dihasilkan dari sub-model tersebut sesuai dengan pengukuran pada sistem nyata. Salah satu cara untuk melakukan validasi model adalah dengan menggunakan nilai AME (*Absolute Means Error*), yang merupakan perbandingan antara nilai dari hasil simulasi model terhadap hasil pengamatan, yang berupa pengukuran atau survei atau perhitungan (Muhammadi *et al.*, 2001). Hasil validasi model sistem dinamik untuk polusi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 15 Nilai AME (*absolute means error*) dari model sistem dinamik untuk pencemar gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>

Sub-model SO <sub>2</sub>		Sub-model NO <sub>2</sub>	
Variabel	Nilai AME	Variabel	Nilai AME
Ambien SO <sub>2</sub>	0.953763649	Ambien NO <sub>2</sub>	0.980897949
Penduduk	0.012252361	Penduduk	0.012252361
PDRB	0.014423446	PDRB	0.014423446
Listrik	0.013809099	Listrik	0.013809099
BBM	0.514512610	Mobil	0.054243198

Dari variabel-variabel yang dapat dibandingkan terhadap data riil hasil pengamatan, konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> merupakan variabel yang memiliki nilai AME cukup besar. Hal ini sesuai dengan dugaan Schnelle dan Dey (2000) yang menyatakan bahwa untuk kondisi udara selisih antara nilai pengamatan terhadap nilai model diduga dapat mencapai 100%. Karena pada model yang dikembangkan tidak memperhitungkan

kondisi perkecualian lingkungan yang berdampak pada kapasitas dispersi atmosfer, sedangkan kondisi ini sangat berpengaruh terhadap hasil pengukuran.

Di samping nilai AME untuk konsentrasi ambien kedua gas penyebab deposisi asam, nilai AME pada variabel BBM juga cukup tinggi. Hal ini disebabkan data volume konsumsi BBM yang digunakan untuk mengembangkan sub-model simulasi gas SO<sub>2</sub> merupakan data agregat dari seluruh penggunaan jenis BBM, sedangkan tiap jenis BBM memiliki faktor emisi yang berbeda. Namun demikian secara umum nilai-nilai AME yang diperoleh pada kedua sub-model simulasi sistem dinamik yang dikembangkan masih dalam rentangan yang masuk akal, sehingga model dapat dikatakan valid.

#### 4.3.2.2. Uji Sensitivitas

Setelah kedua sub-model estimasi yang dikembangkan dengan metode simulasi sistem dinamik diuji validitasnya, maka perlu dilakukan uji terhadap sensitivitasnya. Uji sensitivitas bertujuan untuk menjelaskan seberapa sensitif parameter, variabel, dan hubungan antar variabel dalam model terhadap perubahan (Muhammadi *et al.*, 2001). Dalam penelitian ini analisis sensitivitas terhadap model simulasi dinamik dilakukan dengan melakukan intervensi fungsional dan intervensi struktural.

##### 4.3.2.2.1 Intervensi Fungsional

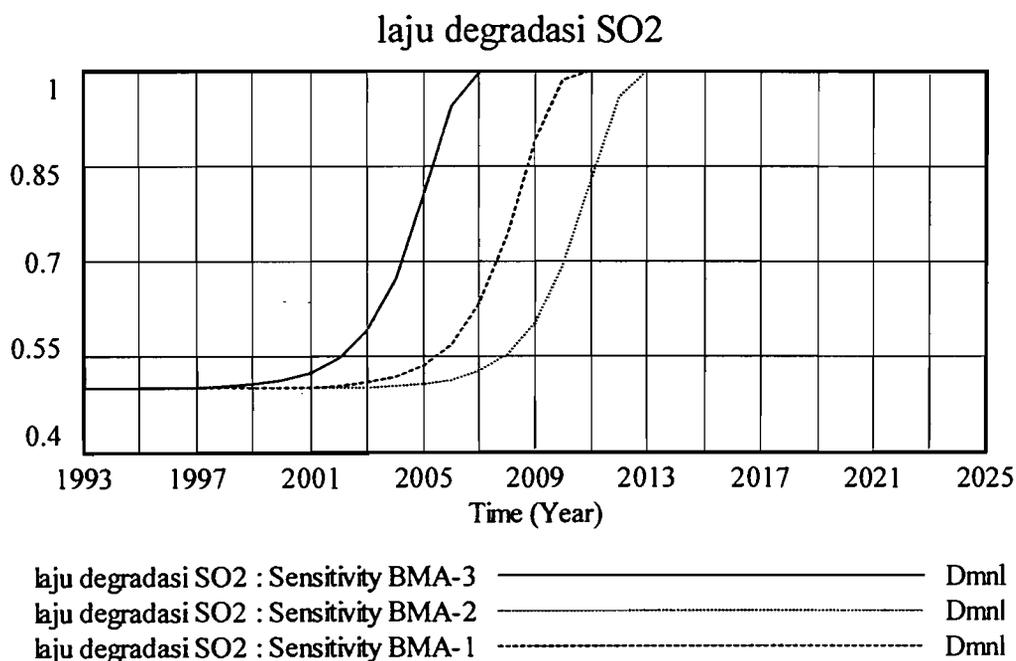
Intervensi fungsional adalah intervensi atau perubahan terhadap parameter tertentu atau kombinasi parameter tertentu dalam model. Dalam penelitian ini intervensi fungsional dilakukan terhadap perubahan parameter lingkungan dan ekonomi. Untuk parameter lingkungan analisis sensitivitas dilakukan berdasarkan perubahan BMA (baku mutu ambien) terhadap dinamika laju degradasi, jumlah orang yang meninggal dan sakit. Sedangkan untuk parameter ekonomi analisis sensitivitas dilakukan berdasarkan perubahan harga satuan listrik terhadap manfaat bersih dan nilai manfaat bersih sekarang (*present value net benefit = PVnetben*).

Analisis sensitivitas terhadap sub-model simulasi sistem dinamik untuk polusi gas SO<sub>2</sub> yang telah dikembangkan dilakukan dengan mengubah variabel-variabel yang

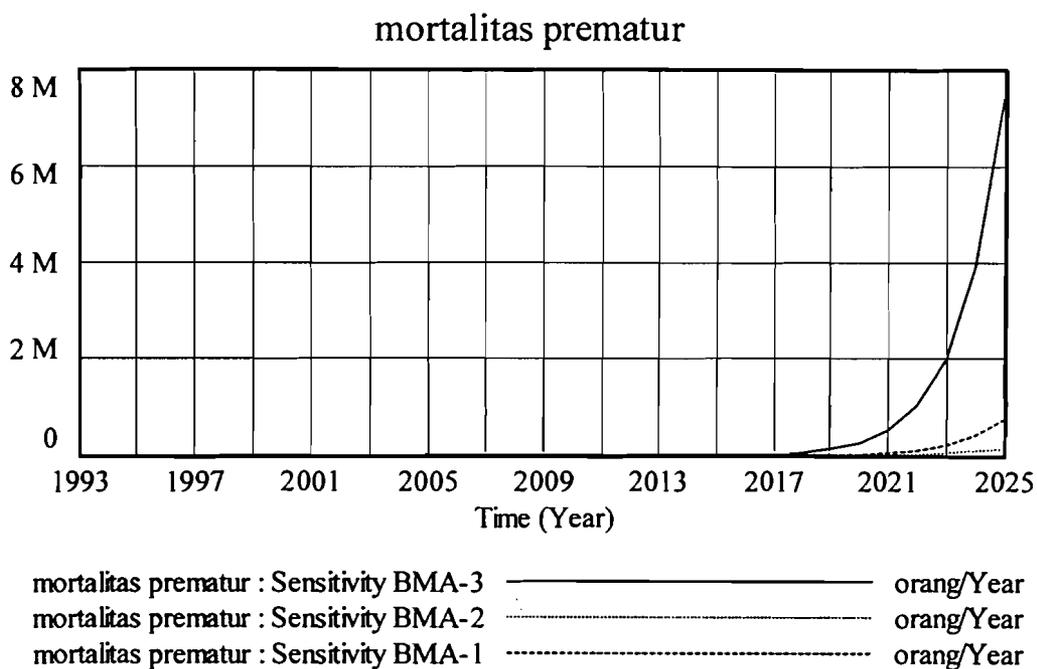
dianggap sangat berpengaruh dalam sub-model secara drastis, dan hasilnya dapat dilihat pada beberapa grafik di bawah ini.

1. Perubahan dilakukan pada variabel baku mutu ambien gas  $\text{SO}_2$  (BMA  $\text{SO}_2$ ), yang dianggap sangat berpengaruh terhadap degradasi lingkungan dan jumlah orang yang terpapar polutan ini:
  - a. Pada kondisi awal (Sensitivity BMA-1) BMA  $\text{SO}_2$  adalah 0,02 ppm.
  - b. Pada sensitivity BMA-2 nilai variabel BMA  $\text{SO}_2$  dinaikkan menjadi sebesar 0,1 ppm.
  - c. Pada sensitivity BMA-3 nilai variabel BMA  $\text{SO}_2$  diturunkan sampai dengan 0,002 ppm.

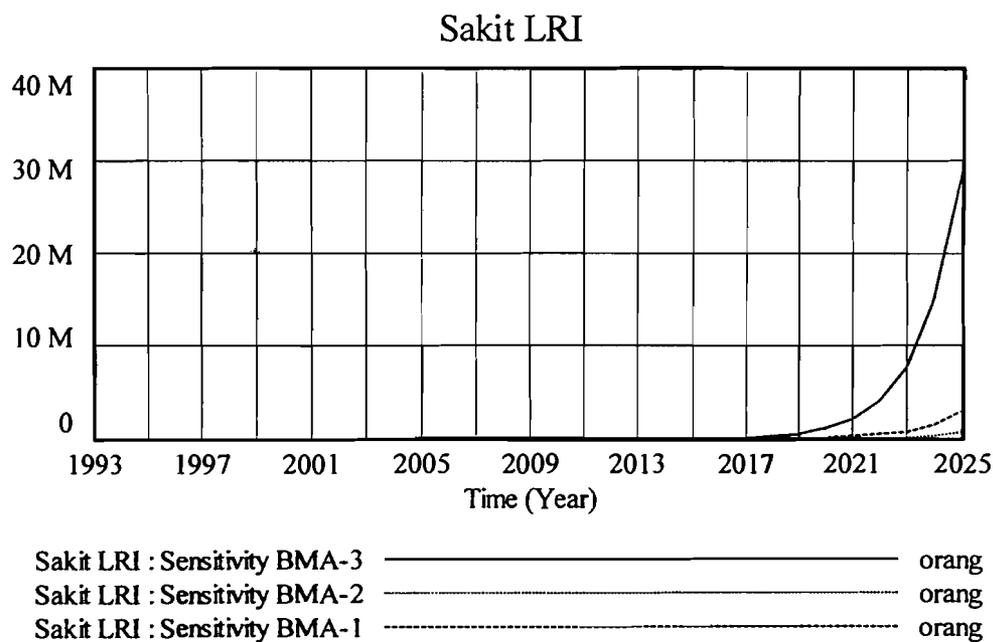
Hasil simulasi terhadap perubahan-perubahan nilai BMA  $\text{SO}_2$  tersebut dapat dilihat pada perubahan laju degradasi dan jumlah orang meninggal, serta jumlah orang sakit sebagai berikut:



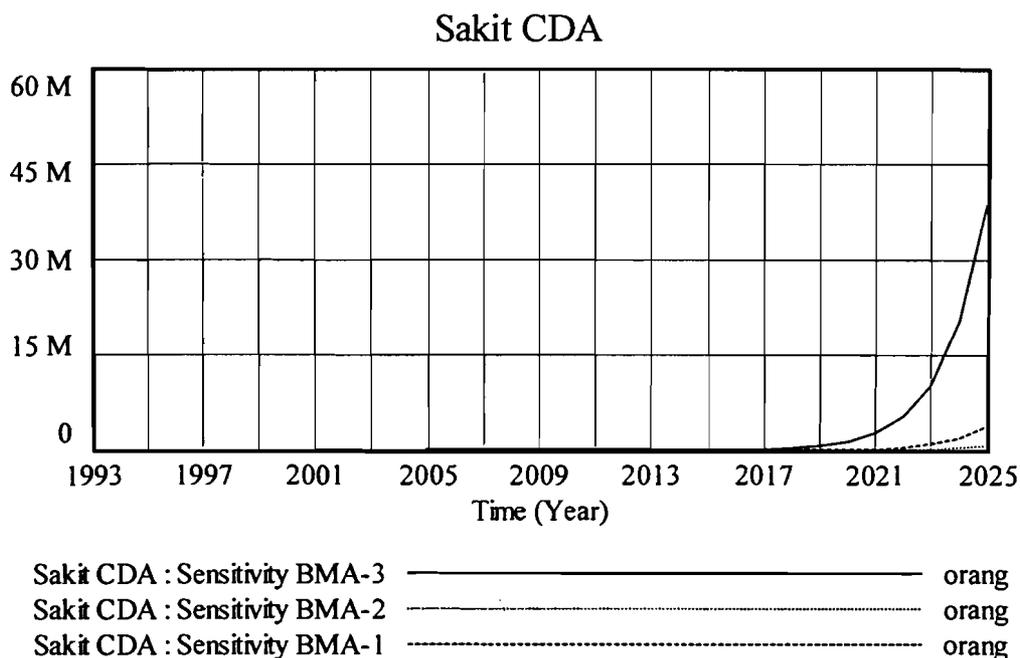
Gambar 7 Dampak perubahan BMA gas  $\text{SO}_2$  terhadap laju degradasi pada sub-model simulasi sistem dinamik  $\text{SO}_2$



Gambar 8 Dampak perubahan BMA gas  $\text{SO}_2$  terhadap jumlah orang meninggal (mortalitas prematur) pada sub-model simulasi sistem dinamik  $\text{SO}_2$



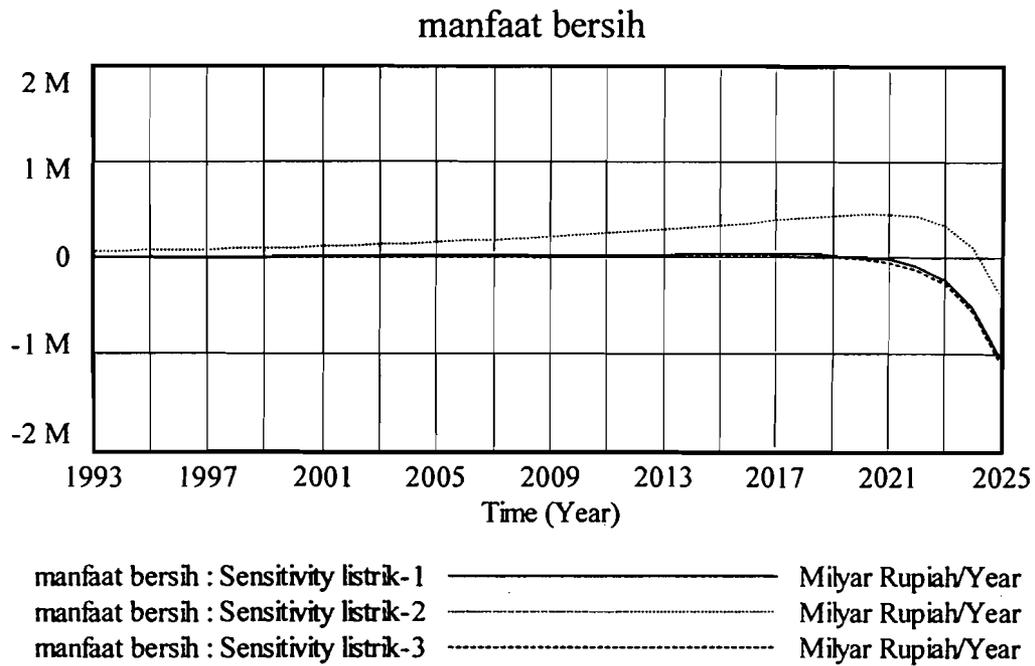
Gambar 9 Dampak perubahan BMA gas  $\text{SO}_2$  terhadap jumlah orang sakit LRI pada sub-model simulasi sistem dinamik  $\text{SO}_2$



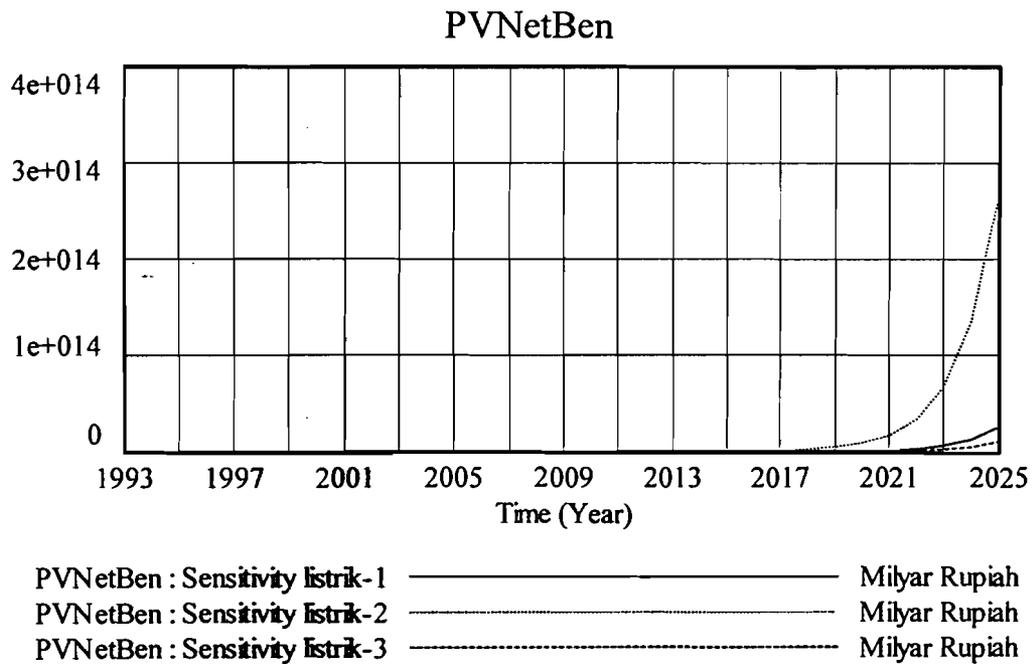
Gambar 10 Dampak perubahan BMA gas  $\text{SO}_2$  terhadap jumlah orang sakit CDA pada sub-model simulasi sistem dinamik  $\text{SO}_2$

2. Perubahan dilakukan pada variabel harga satuan listrik, yang dianggap sangat mempengaruhi nilai manfaat bersih dan PVNetben:
  - a. Pada kondisi awal (Sensitivity listrik-1) harga listrik ditetapkan sebesar Rp 495 tiap kWh.
  - b. Sensitivity listrik-2 merupakan harga listrik yang dinaikkan sampai sebesar Rp 5000 tiap kWh.
  - c. Sensitivity listrik-3 merupakan harga listrik yang diturunkan sampai sebesar Rp 200 tiap kWh.

Hasil simulasi terhadap perbedaan harga satuan listrik ini dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 11 Dampak perubahan harga listrik terhadap nilai manfaat bersih pada sub-model simulasi sistem dinamik  $\text{SO}_2$

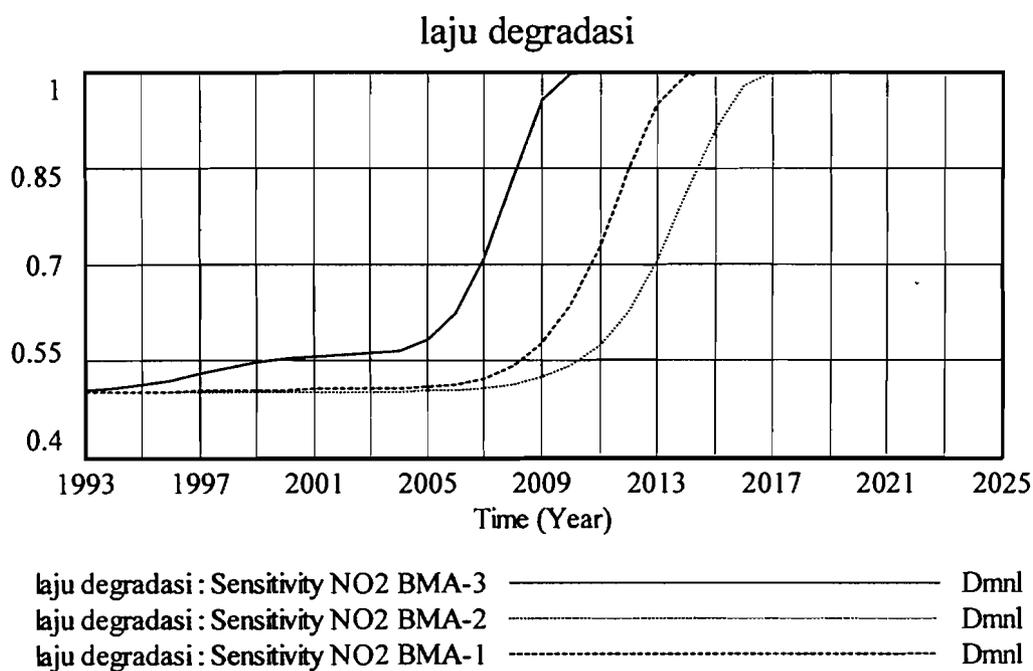


Gambar 12 Dampak perubahan harga listrik terhadap nilai PVNetben pada sub-model simulasi sistem dinamik  $\text{SO}_2$

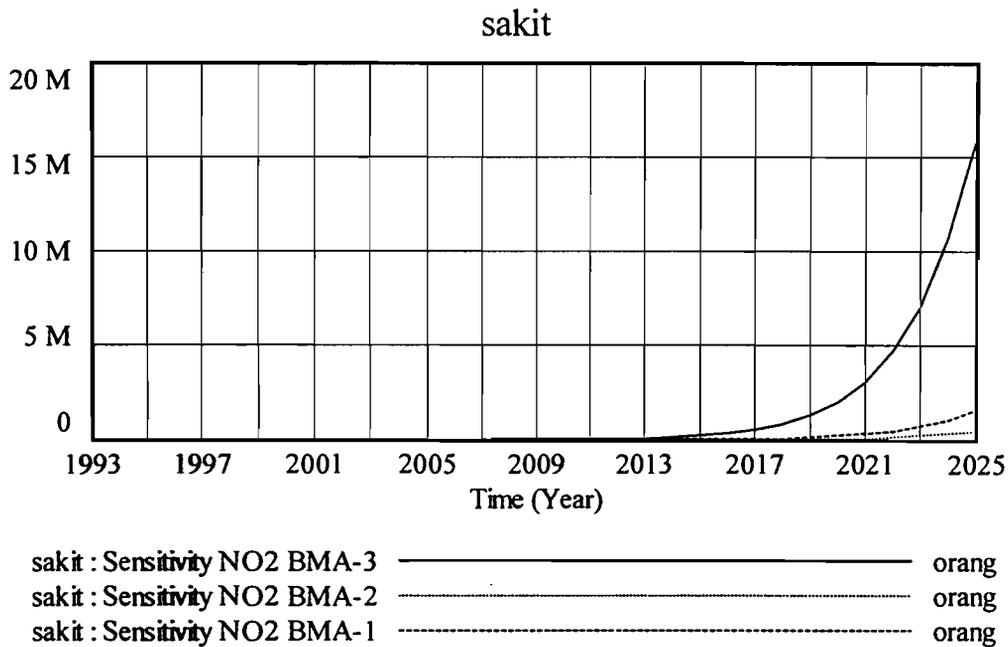
Analisis sensitivitas terhadap sub-model simulasi sistem dinamik untuk polusi gas  $\text{NO}_2$  yang telah dikembangkan juga dilakukan dengan mengubah parameter lingkungan dan ekonomi secara drastis, dan hasilnya dapat dilihat pada beberapa grafik di bawah ini.

1. Perubahan dilakukan pada variabel baku mutu ambien gas  $\text{NO}_2$  (BMA  $\text{NO}_2$ ), yang mewakili parameter lingkungan dan sosial:
  - a. Pada kondisi awal (Sensitivity  $\text{NO}_2$  BMA-1) BMA  $\text{NO}_2$  adalah 0,03 ppm.
  - b. Pada sensitivity  $\text{NO}_2$  BMA-2 nilai variabel BMA  $\text{NO}_2$  dinaikkan menjadi sebesar 0,1 ppm.
  - c. Pada sensitivity  $\text{NO}_2$  BMA-3 nilai variabel BMA  $\text{NO}_2$  diturunkan sampai dengan 0,003 ppm.

Hasil simulasi terhadap ketiga perubahan nilai BMA gas  $\text{NO}_2$  tersebut, dapat dilihat pada perubahan laju degradasi dan jumlah orang sakit sebagai berikut:



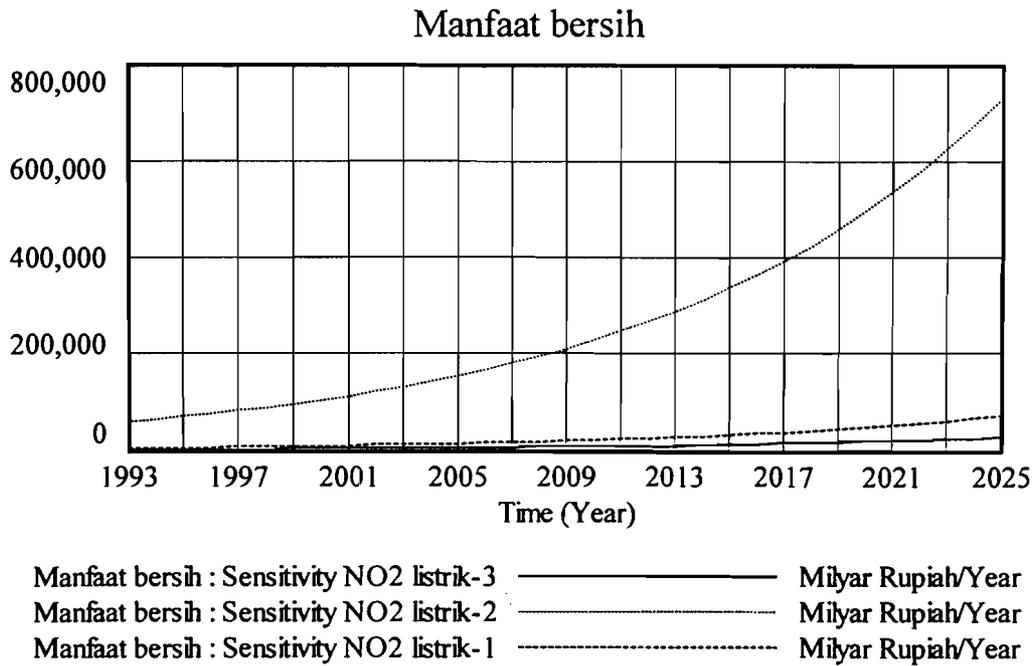
Gambar 13 Dampak perubahan BMA gas  $\text{NO}_2$  terhadap laju degradasi pada sub-model simulasi sistem dinamik  $\text{NO}_2$



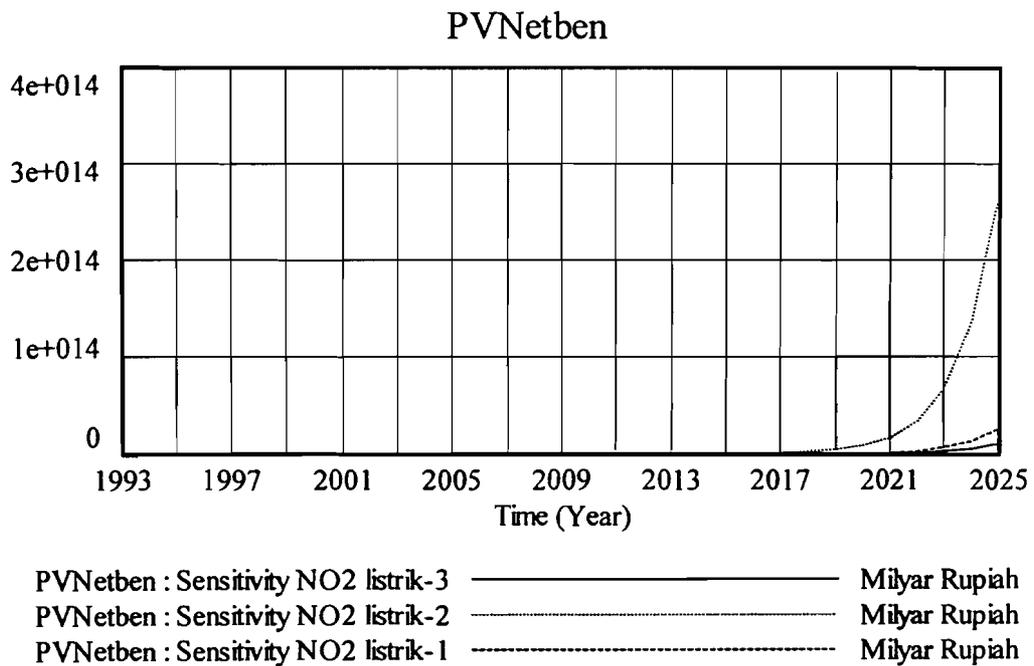
Gambar 14 Dampak perubahan BMA gas NO<sub>2</sub> terhadap jumlah orang sakit pada sub-model simulasi sistem dinamik NO<sub>2</sub>

2. Perubahan dilakukan pada variabel harga satuan listrik, yang dianggap akan sangat berpengaruh terhadap manfaat bersih dan PVNetben:
  - a. Pada kondisi awal (Sensitivity NO<sub>2</sub> listrik-1) harga listrik ditetapkan sebesar Rp 495 tiap kWh.
  - b. Sensitivity NO<sub>2</sub> listrik-2 merupakan harga listrik yang dinaikkan sampai sebesar Rp 5000 tiap kWh.
  - c. Sensitivity NO<sub>2</sub> listrik-3 merupakan harga listrik yang diturunkan sampai sebesar Rp 200 tiap kWh.

Hasil simulasi terhadap perbedaan harga satuan listrik ini dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 15 Dampak perubahan harga listrik terhadap nilai manfaat bersih pada sub-model simulasi sistem dinamik NO<sub>2</sub>

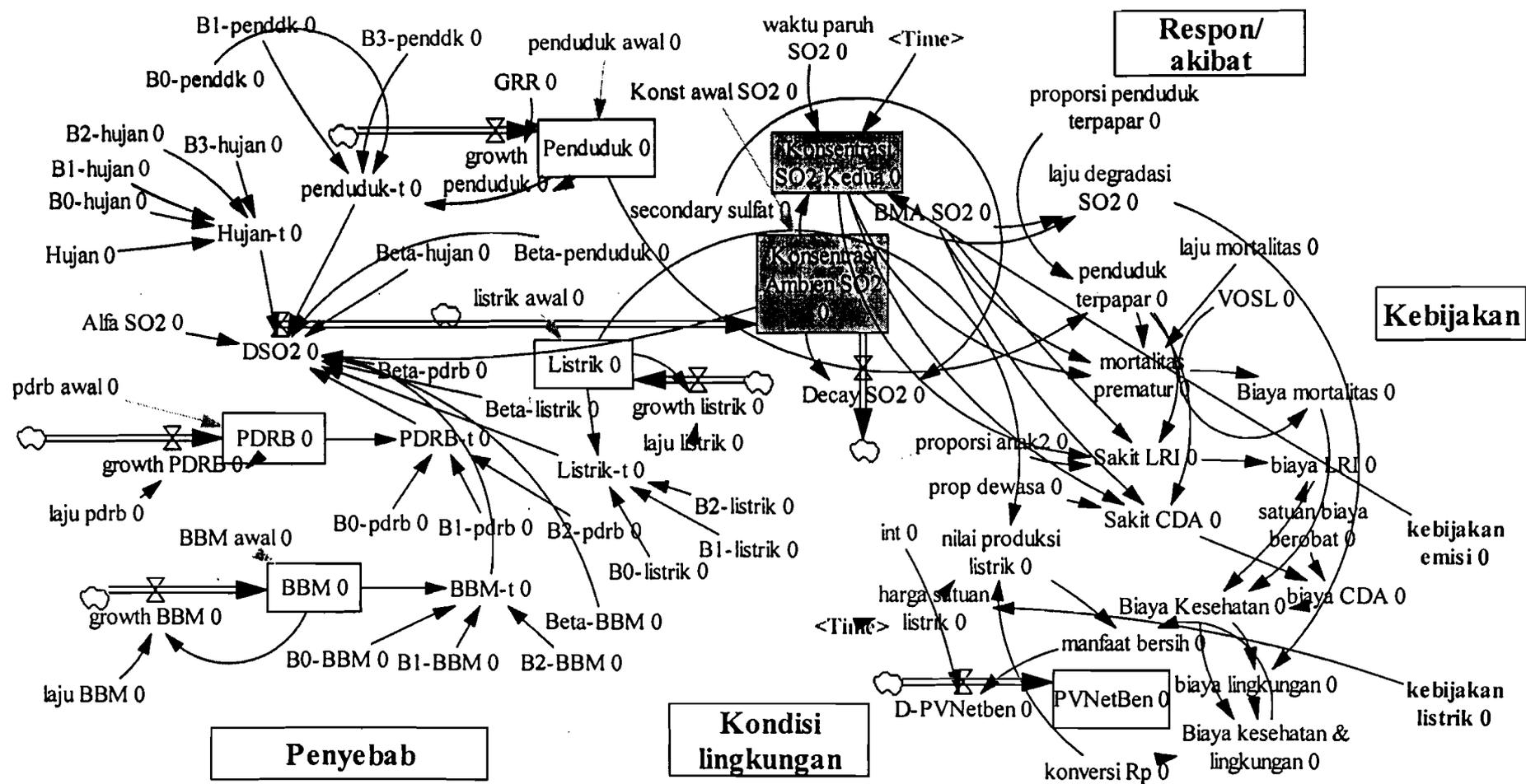


Gambar 16 Dampak perubahan harga listrik terhadap nilai PVNetben pada sub-model simulasi sistem dinamik NO<sub>2</sub>

Hasil intervensi fungsional terhadap parameter lingkungan dan ekonomi menyatakan bahwa pada umumnya hasil simulasi dinamik dari kedua sub-model yang dikembangkan tetap memiliki pola yang sama, meskipun terjadi perubahan yang cukup drastis dari nilai variabel-variabel yang diuji. Sehingga dapat dikatakan kedua sub-model yang dikembangkan cukup stabil. Namun demikian pada sub-model pencemaran gas SO<sub>2</sub> terdapat hasil simulasi yang kurang sesuai dengan harapan, yaitu pada variabel nilai manfaat bersih. Nilai manfaat bersih yang diperoleh mulai tahun 2018 mengalami penurunan, bahkan menjadi negatif diakhir simulasi (mulai tahun 2021 sampai tahun 2025). Untuk itu perlu dilakukan intervensi struktural terhadap sub-model pencemaran gas SO<sub>2</sub>, dengan menambahkan aspek kebijakan.

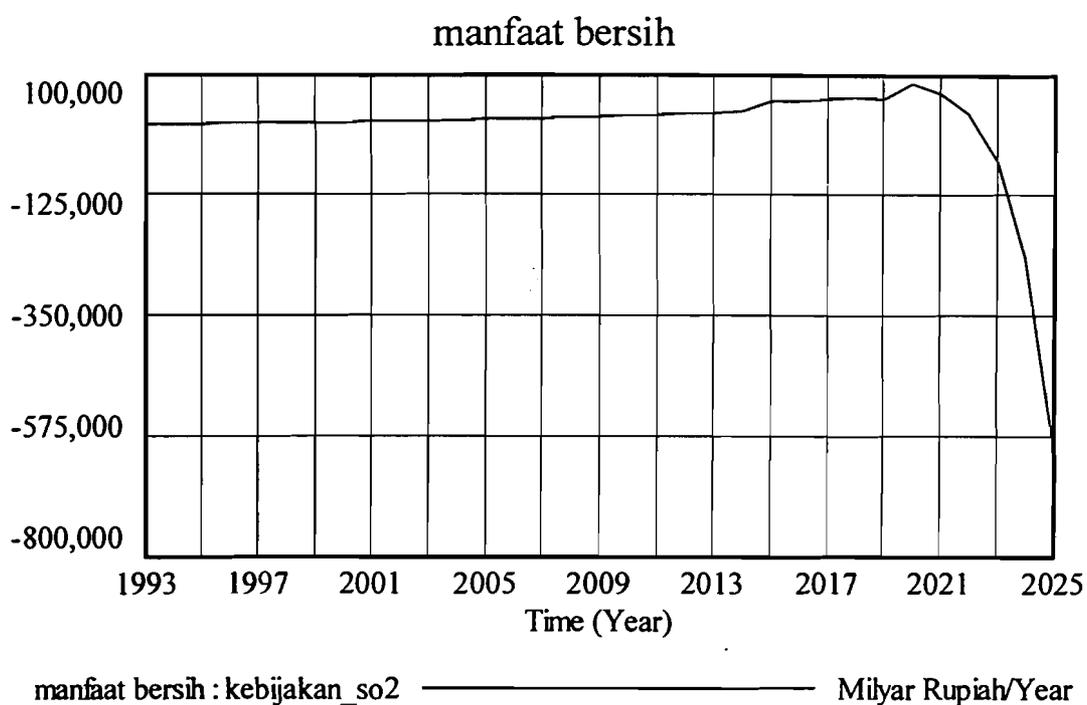
#### **4.3.2.2.2. Intervensi Struktural**

Intervensi struktural adalah intervensi yang dilakukan terhadap model dengan cara mengubah unsur atau hubungan yang membentuk struktur model guna melihat pengaruhnya terhadap hubungan antar unsur atau struktur model. Dalam penelitian ini intervensi struktural dilakukan dengan menambahkan variabel kebijakan emisi dan kebijakan harga listrik terhadap sub-model pencemaran gas SO<sub>2</sub>. Kebijakan emisi ditujukan untuk mengurangi emisi sebanyak 30%, sedangkan kebijakan harga listrik adalah kebijakan untuk menaikkan harga listrik. Kedua kebijakan ini diasumsikan berlaku mulai tahun 2015. Perubahan diagram stok-flow dapat dilihat pada Gambar 17, sedangkan algoritma dari intervensi struktural tersebut dapat dilihat pada Lampiran 10.



Gambar 17 Hasil intervensi struktural pada diagram stok-flow simulasi sistem dinamik sub-model pencemaran gas SO<sub>2</sub>

Meskipun terjadi perbaikan nilai, namun ternyata intervensi kebijakan terhadap struktur sub-model ini tetap memberikan pola yang sama pada variabel manfaat bersih, seperti terlihat pada gambar berikut. Sehingga dapat dikatakan sub-model yang dikembangkan bersifat stabil.

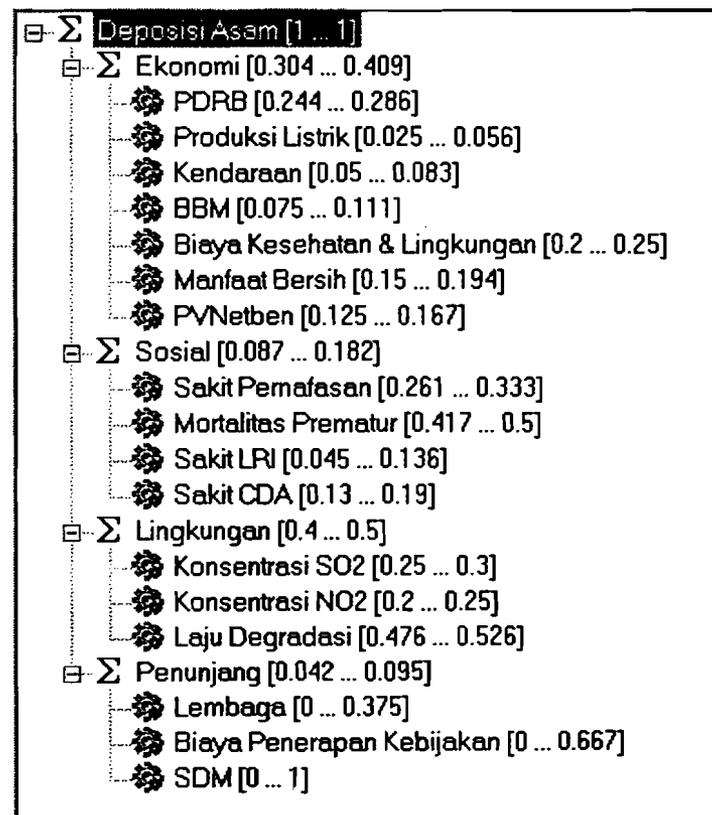


Gambar 18 Dampak intervensi kebijakan terhadap nilai manfaat bersih pada sub-model simulasi sistem dinamik  $SO_2$

Dari hasil intervensi fungsional terhadap parameter lingkungan dan ekonomi, dapat disimpulkan bahwa pada umumnya hasil simulasi dinamik dari kedua sub-model yang dikembangkan tetap memiliki pola yang sama, meskipun terjadi perubahan yang cukup drastis dari nilai variabel-variabel yang diuji. Demikian juga hasil dari intervensi struktural terhadap sub-model pencemaran gas  $SO_2$ , dengan menambahkan aspek kebijakan. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kedua sub-model simulasi sistem dinamik yang dikembangkan bersifat *robust*. Sehingga model tersebut dapat digunakan pada lokasi yang berbeda, yaitu lokasi yang memiliki parameter lingkungan dan ekonomi yang hampir sama dengan wilayah studi, dalam hal ini DKI Jakarta.

#### 4.4. Pengembangan Model Alternatif Kebijakan

Hasil simulasi yang diperoleh dari pengembangan model estimasi menggunakan simulasi sistem dinamik di atas, digunakan untuk mengembangkan beberapa kebijakan alternatif dengan metode multi kriteria analisis. Tahap pertama dalam pengembangan model kebijakan ini adalah menentukan kriteria beserta sub-kriteria yang dianggap akan mempengaruhi kebijakan alternatif yang akan dihasilkan. Dalam penelitian ini kriteria yang diambil adalah kriteria ekonomi, sosial, dan lingkungan, serta penunjang kebijakan. Sedangkan sub-kriteria diambil dari berbagai variabel endogen yang diperoleh dari model simulasi sistem dinamik dan *judgement* kualitatif pada kriteria penunjang kebijakan. Pada kriteria penunjang kebijakan sub-kriteria yang ditetapkan adalah keterlibatan institusi dan biaya penerapan kebijakan serta kualitas SDM. Kriteria dan sub-kriteria tersebut diinputkan dalam perangkat lunak PRIME dalam bentuk *value tree* sebagai berikut:

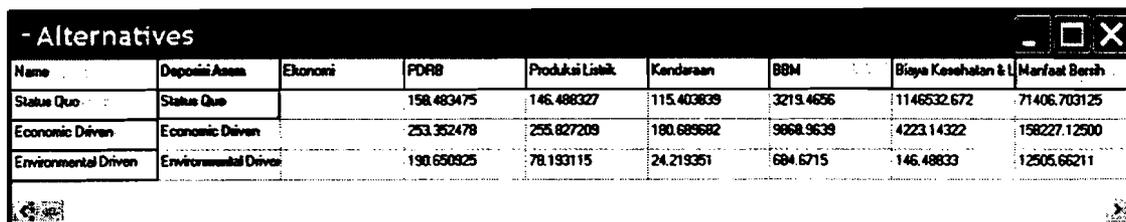


Gambar 19 *Value tree* untuk mengidentifikasi kriteria dan sub-kriteria

Setelah *value tree* dibuat, tahap berikutnya atau tahap kedua dari pengembangan model analisis multi kriteria adalah menentukan skenario basis pembangunan serta memberikan nilai atau pembobotan pada tiap sub-kriteria. Skenario basis pembangunan dikembangkan berdasarkan implikasi pembangunan terhadap kondisi ekonomi, sosial, dan lingkungan yang akan terjadi, sehubungan dengan adanya kebijakan mengenai polusi deposisi asam yang akan diterapkan. Pada penelitian ini diusulkan 3 skenario, yaitu:

1. pembangunan berlangsung seperti sekarang (*bussiness as usual* = *BAU* atau kondisi status quo), atau
2. kebijakan pembangunan yang berbasis ekonomi (*economic driven* = *EC-D*), atau
3. kebijakan pembangunan yang berlandaskan lingkungan (*environmental driven* = *EN-D*).

Berdasarkan pada ketiga skenario yang telah ditetapkan tersebut dilakukan kembali simulasi terhadap sub-model sistem dinamik untuk polusi gas  $SO_2$  dan  $NO_2$  yang telah dikembangkan. Simulasi ulangan dilakukan dengan mengubah berbagai variabel eksogen seperti terlihat pada Lampiran 11. Nilai-nilai yang diperoleh dari hasil simulasi sistem dinamik berdasarkan data pada matriks di Lampiran 11 dianggap sebagai bobot alternatif untuk masing-masing skenario. Data hasil simulasi untuk tahun 2025 diletakkan pada Lampiran 12, dan data ini digunakan untuk mengisi bobot sub-kriteria untuk tiap skenario pada saat mengembangkan model kebijakan alternatif. Pembobotan untuk kriteria kebijakan, dengan sub-kriteria keterlibatan institusi dan biaya penerapan kebijakan, dilakukan secara kualitatif. Berdasarkan data di Lampiran 12 dilakukan proses pembobotan pada window '*Alternative*' dalam perangkat lunak PRIME, seperti dapat dilihat pada gambar berikut.



Name	Depositi Asam	Ekonomi	FDRB	Produksi Listrik	Kendaraan	BBM	Biaya Kesehatan & L	Manfaat Bersih
Status Quo	Status Quo		158.483475	146.488327	115.403839	3213.4656	1146532.672	71406.703125
Economic Driven	Economic Driven		253.352478	255.827209	180.689682	9868.9639	4223.14322	158227.12500
Environmental Driven	Environmental Driven		190.650925	78.193115	24.219351	684.6715	146.48833	12505.66211

Gambar 20 Matriks skenario yang meliputi pembobotan tiap sub-kriteria

Tahap ketiga dari proses pengembangan model alternatif kebijakan adalah memberikan perbandingan terhadap tiap-tiap sub-kriteria pada kriteria yang sama maupun perbandingan tiap kriteria. Perbandingan tersebut dilakukan dalam bentuk *score assessment* dan *weight assessment* serta *holistic comparison* pada window 'preference information', seperti berikut.

Preference Type	References to	Assessed	Remarks
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	PDRB	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	Produksi Listrik	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	Kendaraan	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	BBM	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	Biaya Kesehatan & L...	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	Manfaat Bersih	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	PVNetben	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	Sakit Pernafasan	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	Mortalitas Prematur	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	Sakit LRI	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	Sakit CDA	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	Konsentrasi SO2	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	Konsentrasi NO2	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	Laju Degradasi	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	Lembaga	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	Biaya Penerapan Ke...	Yes	
<input checked="" type="checkbox"/> Score Assessment	SDM	Yes	
<input type="checkbox"/> Weight Assessment	Twig-level attributes	No	Bottom Up
<input checked="" type="checkbox"/> Weight Assessment	Deposisi Asam	Yes	Top Down
<input checked="" type="checkbox"/> Weight Assessment	Ekonomi	Yes	Top Down
<input checked="" type="checkbox"/> Weight Assessment	Sosial	Yes	Top Down
<input checked="" type="checkbox"/> Weight Assessment	Lingkungan	Yes	Top Down
<input checked="" type="checkbox"/> Weight Assessment	Penunjang	Partially	Top Down
<input checked="" type="checkbox"/> Holistic Comparison	Deposisi Asam	Yes	Optional
<input checked="" type="checkbox"/> Holistic Comparison	Ekonomi	Yes	Optional
<input checked="" type="checkbox"/> Holistic Comparison	Sosial	Yes	Optional
<input checked="" type="checkbox"/> Holistic Comparison	Lingkungan	Yes	Optional
<input checked="" type="checkbox"/> Holistic Comparison	Penunjang	No	Optional

Gambar 21 Informasi preferensi untuk menentukan pilihan *score assessment*

Proses penentuan alternatif terbaik dengan menggunakan rumus (2.17) dan (2.18) dapat dilakukan secara otomatis oleh perangkat lunak. Hasil dari pengembangan model

alternatif kebijakan ini berupa 4 (empat) buah window, yaitu: *Value Intervals*, *Weights*, *Dominance* (matriks dominan), serta *Decision Rules*, yang akan dianalisis pada bab berikut.

## V. ANALISIS HASIL MODEL YANG DIKEMBANGKAN

Bab ini akan menganalisis hasil ketiga model yang dikembangkan untuk memberikan alternatif-alternatif kebijakan guna mengendalikan pencemaran deposisi asam. Proses pengembangan serta hasil dari ketiga model telah dibahas secara rinci pada bab sebelumnya. Adakalanya penjelasan pada bab ini saling tumpang tindih (*overlap*), karena analisis terhadap hasil ketiga model tidak dapat dilakukan secara parsial.

### 5.1. Analisis Terhadap Hasil Pengembangan Model Optimasi

Pengembangan model optimasi dengan metode *Goal Programming* bertujuan untuk menghitung jumlah optimal BBF yang dapat digunakan sebagai sumber energi agar dampak pencemaran deposisi asamnya minimal. Hasil dari model optimasi kemudian dibandingkan terhadap PDRB untuk mengetahui apakah terjadi pemborosan penggunaan BBF sebagai sumber energi di DKI Jakarta. Hasil yang diperoleh menyatakan bahwa jumlah optimal BBF bagi penduduk DKI Jakarta adalah setara dengan produksi energi listrik sebesar 50,691 Milyar kWh dengan nilai jual Rp. 25,090 Triliun. Nilai jual listrik ini didasarkan pada harga listrik rata-rata yang terdapat di Keputusan Presiden RI nomor 104 tahun 2003. Jika dibandingkan dengan PDRB pada tahun 2004 yang besarnya Rp. 70,843 Triliun, maka penggunaan energi penduduk DKI Jakarta sangat boros. Nilai penggunaan energi sebesar 35,416 persen dari PDRB merupakan gambaran pemborosan penggunaan energi.

Hasil penelitian ini diperkuat oleh KLH (2006) yang dinyatakan dengan indeks intensitas energi per kapita. Intensitas energi per kapita di Indonesia cukup tinggi dibandingkan dengan negara lain. Elyza dan Hulaiyah (2005) menyatakan intensitas energi adalah perbandingan antara jumlah konsumsi energi per PDB (Pendapatan Domestik Bruto). Semakin efisien penggunaan energi suatu negara, maka nilai intensitasnya semakin kecil. Menurut KLH (2006) negara Jepang memiliki indeks intensitas energi per kapita sebesar 100, dan intensitas energi Indonesia mencapai indeks 505, padahal PDB Indonesia lebih rendah dibandingkan Jepang. Data ini menunjukkan penggunaan energi di Indonesia tidak efisien atau boros.

Meskipun masyarakat Indonesia dikatakan boros dalam menggunakan energi, namun ternyata konsumsi energi per kapita Indonesia masih relatif rendah dibanding negara lain. KLH (2006) menyatakan perbandingan konsumsi energi per kapita antar negara dengan suatu indeks. Jika negara Jepang diberi indeks 100 untuk menyatakan konsumsi energi per kapitanya, maka nilai indeks untuk Indonesia adalah 11, sementara itu Thailand dan Malaysia memiliki indeks 24 dan 49. Di lain pihak negara maju seperti negara-negara Eropa yang tergabung dalam OECD (*Organization for Economic Cooperation and Development*) dan Amerika Serikat memiliki indeks 114 dan 197. Negara-negara maju yang konsumsi energi per kapitanya cukup besar memiliki kondisi lingkungan yang relatif lebih baik dibandingkan dengan negara berkembang, karena PDB mereka cukup tinggi dan sebagian dari PDB digunakan untuk mereduksi emisi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> dari penggunaan BBF sebagai sumber energi.

Pada kondisi seperti sekarang atau kondisi *status quo* atau *Business As Usual*, maka total biaya penalti (*abatement cost*) yang harus dibayarkan untuk mereduksi emisi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> ke udara sampai mencapai baku mutu emisi yang ditetapkan Pemprov DKI adalah sebesar Rp.2007,635 Juta atau sekitar Rp.2,008 Milyar per tahun (lihat Lampiran 3). Dengan dengan nilai jual energi sebesar Rp. 25,090 Triliun tentunya biaya abatemen sebanyak Rp.2,008 Milyar bukanlah merupakan jumlah yang besar, karena biaya abatemen hanya 0,08 persen dari nilai jual. Namun demikian karena penggunaan energi di DKI Jakarta selama ini lebih banyak digunakan untuk konsumsi, bukan untuk produksi maka biaya abatemen yang harus dikeluarkan selama ini belum diperhitungkan dalam biaya produksi energi. Pada pengembangan model optimasi juga dilakukan perubahan harga listrik dan biaya abatemen guna meninjau sejauh mana kedua nilai ini berpengaruh terhadap keuntungan penjualan listrik.

Pada skenario perubahan harga listrik (kenaikan harga satuan listrik) prediksi dari model optimasi menghasilkan biaya penalti (biaya abatemen total) tetap, namun akan terjadi peningkatan keuntungan penjualan listrik (hasil penjualan listrik dikurangi biaya abatemen total). Sementara itu skenario dengan asumsi adanya penurunan biaya abatemen dan BME akan mempengaruhi biaya penalti, namun nilai perubahannya terhadap keuntungan tidak begitu signifikan. Sehingga dapat dikatakan perubahan

terhadap parameter ekonomi (harga listrik dan biaya abatemen) lebih besar pengaruhnya dibandingkan perubahan terhadap parameter lingkungan (BME).

Hasil yang diperoleh dari pengembangan model optimasi bahwa parameter ekonomi berpengaruh cukup signifikan terhadap nilai keuntungan penjualan listrik dapat dijadikan acuan bagi pengembangan model alternatif kebijakan, yang harus mempertimbangkan adanya kebijakan berbasis insentif ekonomi (EI), seperti yang telah dijelaskan pada bab Pendahuluan. Kecilnya pengaruh perubahan BME terhadap keuntungan penjualan listrik juga memperkuat dugaan kurang efektifnya kebijakan lingkungan udara yang diterapkan di Indonesia pada umumnya dan provinsi DKI Jakarta khususnya. Kebijakan lingkungan, khususnya lingkungan udara, yang selama ini berlaku di Indonesia adalah kebijakan berbasis perintah dan kendalikan (CAC) melalui penetapan BME dan BMA.

Biaya untuk mereduksi polutan hingga mencapai BME yang dihasilkan dari model optimasi dapat disetarakan dengan biaya lingkungan yang harus dikeluarkan dalam model estimasi, yang dilakukan dengan mengembangkan model simulasi sistem dinamik. Nilai Rp 2,008 Milyar per tahun yang harus dikeluarkan untuk memperbaiki lingkungan atau untuk mereduksi emisi gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  ke udara sampai mencapai BME pada model simulasi sistem dinamik diperkirakan akan terjadi pada tahun 2009-2010, yaitu pada konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$  sebesar 0.04167 - 0.08133 ppm, dan  $\text{NO}_2$  sebesar 0.00910 - 0.01672 ppm.

Hasil pengembangan model optimasi juga memperlihatkan bahwa jumlah optimum BBF yang dapat digunakan adalah setara dengan BBF yang dapat menghasilkan energi sebesar 50,691 Milyar kWh (lihat Lampiran 2 dan 3). Nilai ini digunakan untuk menganalisis hasil pengembangan model simulasi sistem dinamik, guna memprediksi kapankah kondisi optimum produksi listrik DKI Jakarta akan dipenuhi. Berdasarkan hasil pengembangan model estimasi dengan metode simulasi sistem dinamik, kondisi produksi listrik optimal tersebut akan dicapai pada tahun 2013-2014.

Berdasarkan nilai biaya abatemen yang harus dikeluarkan dan jumlah optimum BBF yang dapat digunakan sebagai sumber energi, maka hasil pengembangan model optimasi dengan GAMS dan model estimasi menggunakan Vensim tidak saling bertentangan. Kondisi produksi listrik optimal yang akan dicapai pada tahun 2013-2014,

akan berdampak pada biaya abatemen yang harus dibayarkan pada tahun berikutnya, yaitu 2015-2016.

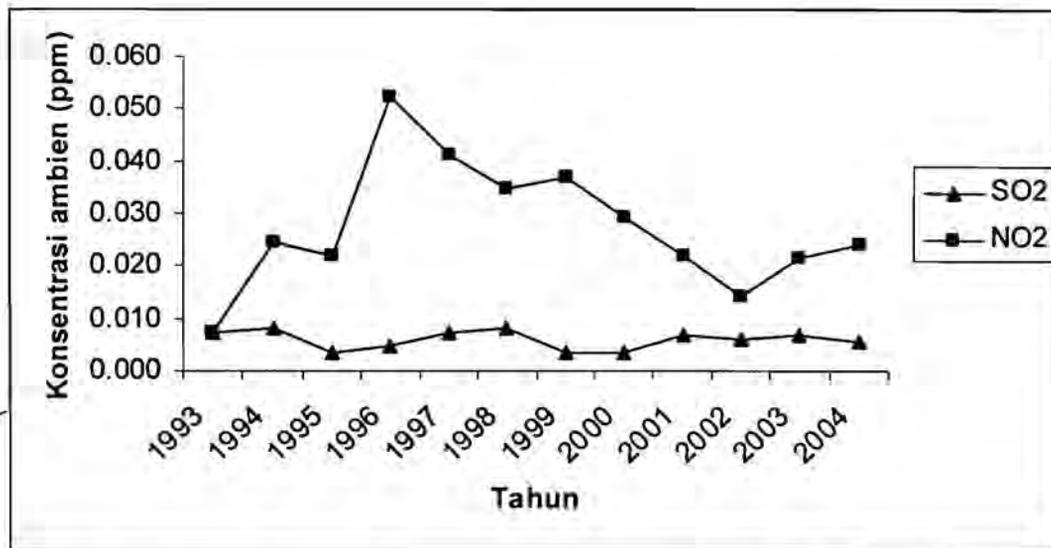
Selama ini biaya untuk mereduksi gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  dari udara ambien belum diperhitungkan dalam biaya produksi, sehingga keuntungan dari penjualan listrik belum ada yang digunakan untuk mereduksi gas-gas pencemar udara, khususnya gas-gas penyebab deposisi asam. Biaya reduksi pencemar kedua gas penyebab deposisi asam perlu diperhitungkan, mengingat pencemaran yang diakibatkannya berdampak luas terhadap aspek lingkungan, ekonomi, maupun sosial seperti yang diperlihatkan pada hasil pengembangan model estimasi berikut.

## **5.2. Analisis Terhadap Hasil Pengembangan Model Estimasi**

Hasil pengembangan model estimasi dengan metode simulasi sistem dinamik dalam penelitian ini digunakan untuk mengetahui faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi konsentrasi gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di udara ambien serta melakukan penilaian terhadap dampaknya pada kondisi lingkungan, sosial, dan ekonomi.

### **5.2.1. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Konsentrasi Gas $\text{SO}_2$ dan $\text{NO}_2$ di Udara Ambien**

Sebelum menganalisis berbagai faktor yang mempengaruhi besarnya konsentrasi ambien kedua gas penyebab deposisi asam, perlu diketahui terlebih dahulu kondisi kedua polutan di udara ambien DKI Jakarta. Di bawah ini digambarkan data hasil pengukuran konsentrasi rata-rata gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di stasiun BMG Jakarta, yang merupakan sebagian dari parameter kualitas udara Jakarta. Pemantauan kadar polutan di udara ambien sangat penting untuk mengevaluasi tingkat konsentrasi polutan yang kontak dengan reseptor. Dalam penelitian ini data tersebut digunakan untuk mengevaluasi dan mengestimasi tingkat besaran dampak kesehatan dan kerusakan lingkungan.



Gambar 22 Konsentrasi ambien rata-rata tahunan gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di DKI Jakarta

Dari Gambar 22 terlihat bahwa konsentrasi ambien pencemar yang melewati dan mendekati batas ambang konsentrasi ambien (BMA gas SO<sub>2</sub> = 0,02 ppm dan NO<sub>2</sub> = 0,03 ppm, Keputusan Gubernur DKI No 551 tahun 2001), hanya terjadi untuk gas NO<sub>2</sub> pada tahun 1996 sampai dengan 2000.

Pengamatan harian yang dilakukan BMG dan direkap dalam bentuk data bulanan memperlihatkan adanya beberapa hasil pengukuran yang menunjukkan bahwa konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di Jakarta telah melebihi batas ambang (lihat Tabel 16). Tabel 16 menunjukkan bahwa konsentrasi ambien gas NO<sub>2</sub> di Jakarta yang melebihi baku mutu udara ambien (BMA) terjadi antara lain pada beberapa bulan di tahun 1996, 1997, 1998, dan 1999 (yang bertanda \*). Sedangkan untuk gas SO<sub>2</sub> hanya terlihat data bulan November tahun 1995 yang melebihi BMA.

Dari Gambar 22 terlihat bahwa konsentrasi rata-rata tahunan pencemar yang berupa gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di udara ambien Jakarta mulai tahun 2001 menurun. Hal ini ada kaitannya dengan usaha pemerintah untuk menyediakan bahan bakar dengan kualitas yang lebih baik di wilayah Jabodetabek yang dimulai pada tahun tersebut. Tetapi sayangnya mulai tahun 2003 terlihat lagi kenaikan konsentrasi ambien pencemar tersebut, dan diprediksi kenaikan ini akan terus terjadi.

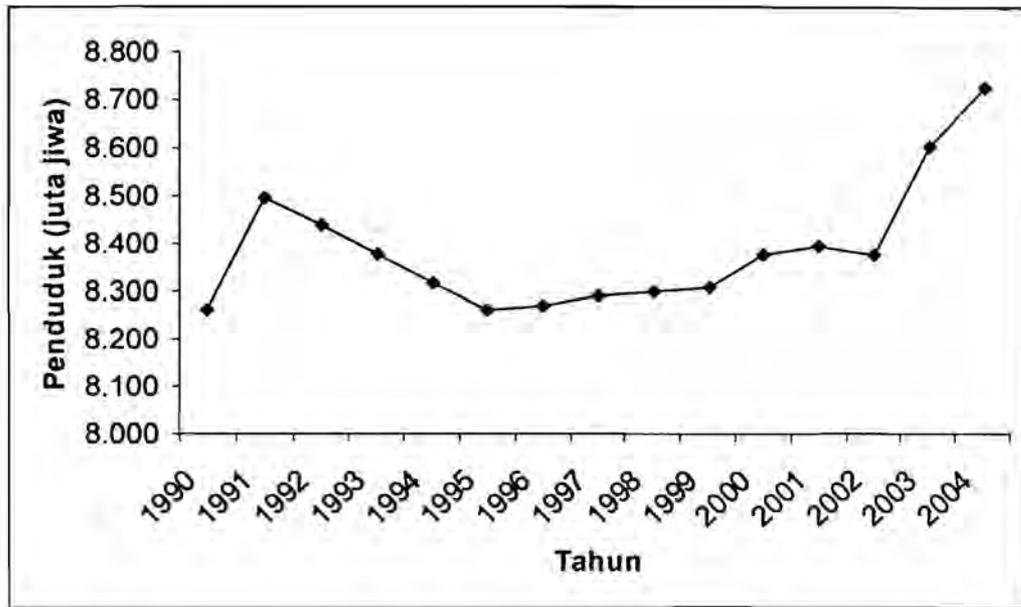
Tabel 16 Konsentrasi ambien rata-rata bulanan gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di DKI Jakarta tahun 1995-1999

Bulan	1995		1996		1997		1998		1999	
	SO <sub>2</sub> (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)								
Januari	0.002	0.033	0.002	0.005	0.005	0.022	0.010	0.035*	0.005	0.021
Februari	0.003	0.016	0.003	0.005	0.006	0.028	0.005	0.040*	0.006	0.030
Maret	0.002	0.008	0.004	0.004	0.005	0.047*	0.013	0.043*	0.002	0.061*
April	0.002	0.016	0.004	0.034	0.018	0.049*	0.012	0.066*	0.005	0.035*
Mei	0.003	0.016	0.005	0.173*	0.013	0.028	0.010	0.038*	0.005	0.045*
Juni	0.003	0.017	0.005	0.084*	0.006	0.058*	0.005	0.033*	0.004	0.039*
Juli	0.005	0.030	0.003	0.093*	0.005	0.035*	0.008	0.012	0.005	0.040*
Agustus	0.006	0.036	0.008	0.083*	0.003	0.010	0.008	0.021	0.004	0.043*
September	0.005	0.036	0.008	0.045*	0.001	0.064*	0.006	0.037*	0.004	0.021
Oktober	0.005	0.020	0.005	0.031*	0.010	0.073*	0.006	0.035*	0.002	0.034*
November	0.030*	0.004	0.006	0.010	0.007	0.051*	0.006	0.021	0.001	0.044*
Desember	0.002	0.006	0.004	0.030	0.012	0.027	--	--	0.002	0.031*

Berdasarkan hasil pengembangan model optimasi pada tahap pertama penelitian ini, diketahui bahwa diperlukan adanya sejumlah biaya untuk mereduksi SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di udara ambien DKI Jakarta. Reduksi kedua gas tersebut dari udara ambien tentunya dimulai dari sumber emisinya, untuk itu perlu diketahui faktor apa saja yang mempengaruhi besarnya konsentrasi kedua gas di udara. Berdasarkan analisis secara statistik yang telah dijabarkan pada bab 4, dapat disimpulkan bahwa variabel-variabel yang mempengaruhi besarnya konsentrasi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di udara ambien, adalah:

1. Jumlah penduduk:

Dalam penelitian ini penduduk menjadi objek utama, dimana pencemaran deposisi asam diawali dengan adanya keinginan penduduk untuk meningkatkan kesejahteraannya. Provinsi DKI Jakarta sebagai ibukota negara menyebabkan provinsi ini memiliki fasilitas pekerjaan, pendidikan, maupun hiburan yang lebih baik dibandingkan provinsi lainnya, sehingga terjadi urbanisasi yang meningkatkan jumlah penduduk. Adanya peningkatan jumlah penduduk juga meningkatkan kebutuhan energi, yang sebagian besar dipenuhi dengan pembakaran BBF, dan akhirnya menyebabkan terjadinya pencemaran deposisi asam. Berdasarkan hasil survei sosial ekonomi nasional (Susenas) yang dilakukan BPS perubahan jumlah penduduk DKI Jakarta pada tahun 1990-2004 dapat dilihat pada Gambar 23.



Gambar 23 Jumlah penduduk di provinsi DKI Jakarta tahun 1990-2004

Dalam penelitian ini pengaruh jumlah penduduk terhadap konsentrasi ambien pencemar menyatakan bahwa makin besar jumlah penduduk akan makin besar konsentrasi gas  $SO_2$  dan  $NO_2$  di udara ambien. Meskipun demikian peningkatan jumlah penduduk tidak berkorelasi secara linier dengan konsentrasi gas  $SO_2$  di udara ambien, melainkan merupakan persamaan dengan fungsi kubik (pangkat 3). Hal ini menyebabkan pengaruh variabel penduduk terhadap konsentrasi gas  $SO_2$  di udara ambien perlu ditransformasi. Sedangkan hubungan antara jumlah penduduk terhadap konsentrasi gas  $NO_2$  di udara ambien berkorelasi secara linier, sehingga pengaruh variabel penduduk terhadap konsentrasi ambien gas  $NO_2$  di udara tidak perlu ditransformasi.

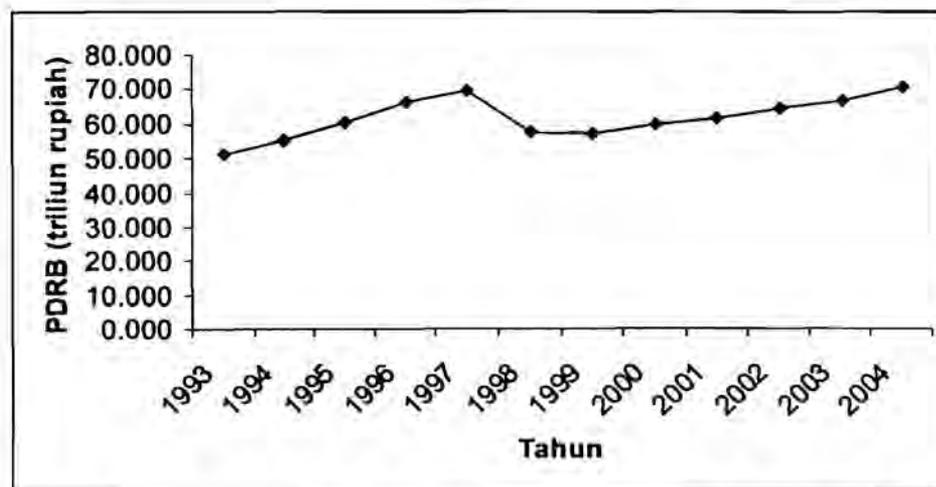
Hubungan antara jumlah penduduk terhadap konsentrasi ambien  $NO_2$  yang linier disebabkan pembentukan gas  $NO_x$  di udara ambien sangat bergantung pada peningkatan pemanasan udara. Temperatur udara yang tinggi menyebabkan gas  $N_2$  dan  $O_2$  yang terdapat dalam jumlah besar di udara (78 persen  $N_2$  dan 19 persen  $O_2$ ) akan bereaksi menghasilkan gas  $NO_x$ . Peningkatan temperatur udara ambien 95 persen disebabkan oleh kegiatan manusia (Howells, 1995), karena itulah

konsentrasi gas  $\text{NO}_x$  di udara ambien, yang dapat diwakili oleh gas  $\text{NO}_2$ , berbanding lurus dengan jumlah penduduk.

Sedangkan pembentukan gas  $\text{SO}_2$  di udara diawali dengan adanya sejumlah kandungan unsur S (sulfur) dalam BBF yang digunakan sebagai sumber energi. Dalam pembakaran BBF terjadi peningkatan temperatur, dan S yang diemisikan dari BBF akan bereaksi dengan gas  $\text{O}_2$  dan uap air yang terdapat di udara membentuk gas  $\text{SO}_x$ . Kondisi inilah yang menyebabkan hubungan antara konsentrasi gas  $\text{SO}_2$  di udara ambien tidak berkorelasi secara linier terhadap jumlah penduduk, karena tiap jenis BBF memiliki kandungan S yang berbeda, yang dinyatakan dalam faktor emisi.

## 2. PDRB (Produk Domestik Regional Bruto):

Kondisi perekonomian DKI Jakarta dalam penelitian ini diwakili dengan data PDRB. PDRB (produk domestik regional bruto) merupakan besaran yang menyatakan pendapatan di daerah tertentu yang timbul karena adanya kegiatan produksi barang dan jasa yang dihasilkan oleh faktor produksi yang dimiliki oleh penduduk. Perubahan PDRB dari tahun 1990 sampai dengan 2004 di provinsi DKI Jakarta dapat dilihat pada Gambar 24. Hasil perhitungan terhadap data ini menyatakan bahwa pertumbuhan PDRB rata-rata per tahun adalah 0,036 atau 3,6 persen.



Gambar 24 PDRB provinsi DKI Jakarta atas dasar harga konstan 1993

Gambar 24 dan hasil perhitungan tentang pertumbuhan PDRB memperlihatkan terjadinya peningkatan PDRB provinsi DKI Jakarta yang cukup signifikan. Namun demikian pertumbuhan perekonomian ini masih jauh dari target pemerintah yang mencanangkan tingkat pertumbuhan ekonomi sebesar 7 persen. Dengan pertumbuhan ekonomi seperti pada penelitian ini (3,6 persen) saja diprediksi gas-gas penyebab polusi deposisi asam di udara ambien akan melebihi BMA-nya sekitar tahun 2009, apalagi dengan target pemerintah dimana pertumbuhan ekonomi harus mencapai 7 persen, tentunya tanpa kebijakan yang efisien polusi ini akan semakin tinggi. Prediksi ini didasarkan pada asumsi adanya peningkatan PDRB yang akan menyebabkan terjadinya perubahan gaya hidup penduduk DKI Jakarta sebagai dampak dari meningkatnya kesejahteraan.

Perbandingan antara pertumbuhan konsumsi energi dengan pertumbuhan ekonomi dinyatakan dengan nilai elastisitas energi. Semakin rendah nilai elastisitas energi maka semakin efisien penggunaan energi. Menurut Elyza dan Hulaiyah (2005) tahun 1985-2000 nilai elastisitas energi Indonesia berada pada kisaran 1,04–1,35, sedangkan nilai elastisitas energi negara-negara maju pada kurun waktu yang sama berada pada kisaran 0,55–0,65. Nilai elastisitas energi yang tinggi disebabkan karena penggunaan energi di Indonesia lebih banyak untuk konsumsi dibandingkan untuk produksi, sehingga pertumbuhan ekonomi lebih rendah dibandingkan dengan peningkatan penggunaan energi. Kondisi ini menyebabkan tingkat pertumbuhan ekonomi sebesar 7 persen seperti yang diharapkan pemerintah sebenarnya masih dapat dicapai tanpa meningkatkan konsentrasi ambien gas-gas penyebab deposisi asam yang diemisikan dari pembakaran BBF, sepanjang penggunaan BBF sebagai sumber energi dilakukan secara efisien. Efisiensi penggunaan energi diharapkan dapat meningkatkan kesejahteraan masyarakat secara signifikan tanpa harus meningkatkan penggunaan energi secara besar-besaran.

Variabel PDRB yang menggambarkan tingkat kesejahteraan masyarakat berpengaruh kepada konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di udara, seperti yang digambarkan dengan kurva lingkungan Kuznet. Pada penelitian Susandi (2004) dikatakan bahwa PDB (Produk Domestik Bruto) per kapita akan mempengaruhi emisi per kapita, yang selanjutnya akan mempengaruhi konsentrasi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di udara ambien, seperti dijelaskan pada persamaan (2.2). Pada penelitian ini tidak digunakan variabel PDB per kapita, karena variabel penduduk sudah digunakan sebagai salah satu variabel yang dianggap mempengaruhi konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di udara. Jika variabel PDB per kapita digunakan lagi, maka akan terjadi otokorelasi antara variabel jumlah penduduk terhadap variabel PDB per kapita.

Meskipun penelitian ini menggunakan PDRB sebagai variabel yang menggambarkan tingkat kesejahteraan penduduk, namun hasilnya hampir sama dengan prediksi Kuznet maupun hasil penelitian Susandi (2004). Penghasilan penduduk, baik yang dinyatakan dengan PDRB (penelitian ini) maupun PDB per kapita (penelitian Susandi, 2004) memiliki fungsi kuadrat terhadap konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di udara. Meskipun nilai-nilai parameter regresi yang dihasilkan berbeda, seperti terlihat pada Tabel 17.

Tabel 17 Perbandingan hasil penelitian Susandi (2004) terhadap penelitian ini

Parameter	SO <sub>2</sub>		NO <sub>2</sub>	
	Susandi	Penelitian Ini	Susandi	Penelitian Ini
$\beta_0$	-148,41	0,0799	-54,832	-0,2947
$\beta_1$	201,26	-0,0024	73,524	0,0097
$\beta_2$	-9,4216	0,00002	-1,4796	-0,00007

Perbedaan tanda yang dihasilkan pada koefisien sub-model pencemaran gas SO<sub>2</sub> antara penelitian Susandi (2004) terhadap penelitian ini dapat disebabkan oleh perbedaan variabel yang digunakan. Pada penelitian

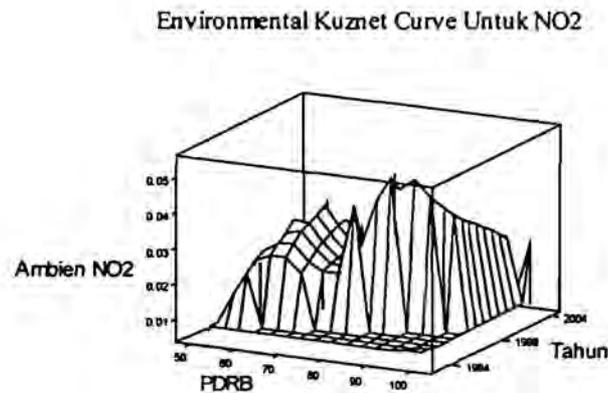
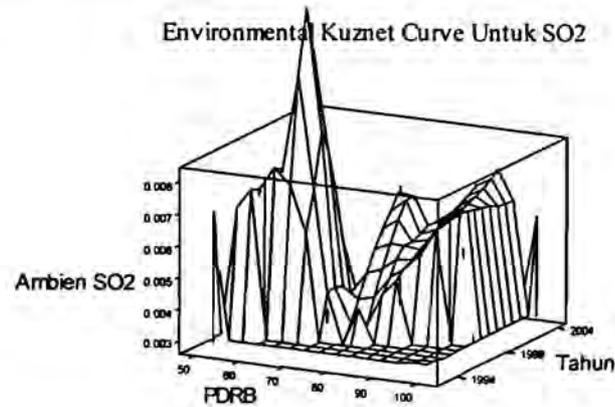
Susandi digunakan variabel PDB per kapita, sedangkan penelitian ini menggunakan variabel PDRB, sebagai variabel yang menyatakan tingkat kesejahteraan penduduk. Susandi menggunakan variabel emisi  $\text{SO}_2$ , yang diprediksi dari pembakaran BBM dan batubara di Indonesia, di lain pihak penelitian ini menggunakan data konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$  di Jakarta. Mengingat jenis BBM dan batubara yang digunakan di Indonesia sangat beragam, maka penggunaan variabel emisi  $\text{SO}_2$  yang diturunkan dari koefisien emisi ataupun faktor emisi akan menyebabkan terjadinya *over* estimasi atau *under* estimasi.

Perbedaan tanda koefisien tidak terjadi pada sub-model pencemaran gas  $\text{NO}_2$  karena timbulnya pencemaran ini disebabkan oleh peningkatan temperatur akibat pembakaran BBF. Tidak seperti pencemaran gas  $\text{SO}_2$  yang disebabkan oleh adanya kandungan Sulfur (S) dalam BBF, yang diemisikan sebagai gas  $\text{SO}_2$  pada saat pembakaran. Penggunaan prediksi emisi  $\text{NO}_2$  (penelitian Susandi) maupun konsentrasi ambien  $\text{NO}_2$  (penelitian ini) sebagai variabel yang menyatakan degradasi lingkungan tidak membedakan tanda pada koefisien yang dihasilkan.

Hasil penelitian ini menyatakan bahwa kondisi DKI Jakarta tidak sepenuhnya sesuai dengan prediksi Kuznet dalam bentuk EKC, yang memperlihatkan bahwa pada awal peningkatan kesejahteraan penduduk akan diikuti dengan peningkatan degradasi lingkungan sesuai dengan meningkatnya pendapatan. Prediksi Kuznet selanjutnya setelah tingkat kesejahteraan mencapai titik tertentu (titik balik) degradasi lingkungan akan menurun meskipun pendapatan naik, dan hal ini tidak terjadi di DKI Jakarta.

Titik balik dapat diperoleh dengan menghitung turunan pertama dari persamaan pangkat 2 yang diperoleh adalah nol, atau  $-\beta_1/2\beta_2$ . Untuk gas  $\text{SO}_2$  diperoleh nilai PDRB = 60 Triliun Rupiah sebagai titik balik, dan kondisi ini telah dicapai DKI Jakarta pada tahun 2000-2001 (lihat Lampiran 1). Sedangkan untuk gas  $\text{NO}_2$  titik balik dicapai pada PDRB = 69,286 Triliun Rupiah atau kondisi pada tahun 2003-2004 (lihat Lampiran 1). Gambar

berikut memperlihatkan kurva lingkungan Kuznet yang dihasilkan dari penelitian ini.



Gambar 25 Kurva lingkungan Kuznet hasil penelitian

Meskipun berdasarkan prediksi Kuznet peningkatan pendapatan penduduk yang dinyatakan dengan PDRB sudah tidak akan meningkatkan polusi udara yang berupa gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>, karena telah melampaui titik balik, namun kondisi ini tidak terjadi di DKI Jakarta. Hal ini disebabkan karena pendapatan penduduk DKI Jakarta sangat bervariasi atau tidak merata. Selin itu, konsentrasi ambien dari kedua polutan tidak hanya dipengaruhi oleh pendapatan penduduk, tetapi juga dipengaruhi oleh variabel-variabel lain, seperti yang dihasilkan dalam penelitian ini.

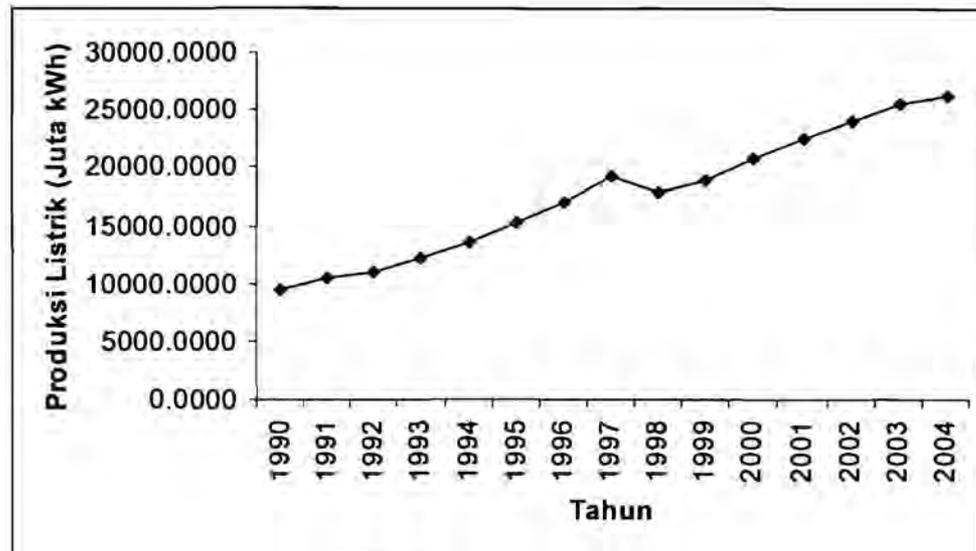
Kurva lingkungan Kuznet yang dihasilkan dari penelitian ini memperlihatkan terjadinya puncak-puncak yang tidak beraturan. Menurut Fauzi (2007) hal yang mungkin mempengaruhi kondisi ini adalah adanya *hysteresis* yaitu keadaan dimana sistem sumberdaya alam mengalami keterkaitan dengan masa lalu (*path dependency*). Selain itu menurut Fauzi (2007) EKC hanya berlaku jika degradasi sumberdaya alam bersifat dapat pulih (*reversible*), sehingga peningkatan PDRB sebagian dapat digunakan untuk memperbaiki lingkungan. Sedangkan polusi udara yang berupa gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> sebagian besar diemisikan oleh pembakaran BBF, seperti diketahui BBF merupakan sumberdaya alam yang bersifat tidak dapat pulih (*irreversible*).

### 3. Listrik:

Kebutuhan listrik di DKI Jakarta bertambah besar setiap tahunnya, seperti terlihat pada Gambar 26. Pengolahan terhadap data produksi listrik di DKI Jakarta menghasilkan pertumbuhan produksi listrik rata-rata adalah 8,1 persen per tahun. Menurut PE-UI (2004) kebutuhan listrik di Indonesia meningkat rata-rata sekitar 8 persen setahun, berarti pertumbuhan produksi listrik di DKI Jakarta secara umum hampir sama dengan peningkatan kebutuhan listrik nasional. PE-UI (2004) menyatakan bahwa elastisitas rata-rata untuk energi listrik di Indonesia adalah 1,5. Hal ini berarti kenaikan 1 persen pada pertumbuhan ekonomi membutuhkan peningkatan konsumsi listrik sebesar 1,5 persen.

Tingginya kebutuhan listrik untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi memperlihatkan bahwa penggunaan listrik di Indonesia masih lebih banyak yang dilakukan untuk konsumsi bukan untuk produksi dan tidak efisien. Sementara itu produk listrik yang dihasilkan oleh PLN menggunakan BBF sebagai bahan bakunya, sehingga mengemisikan gas-gas pencemar ke udara, termasuk gas-gas penyebab deposisi asam. Jumlah produksi listrik di Provinsi DKI Jakarta makin meningkat tiap tahunnya dan sebagian besar bahan baku listrik adalah batubara yang mengandung Sulfur (S), sehingga

peningkatan produksi listrik akan meningkatkan konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$  di udara.

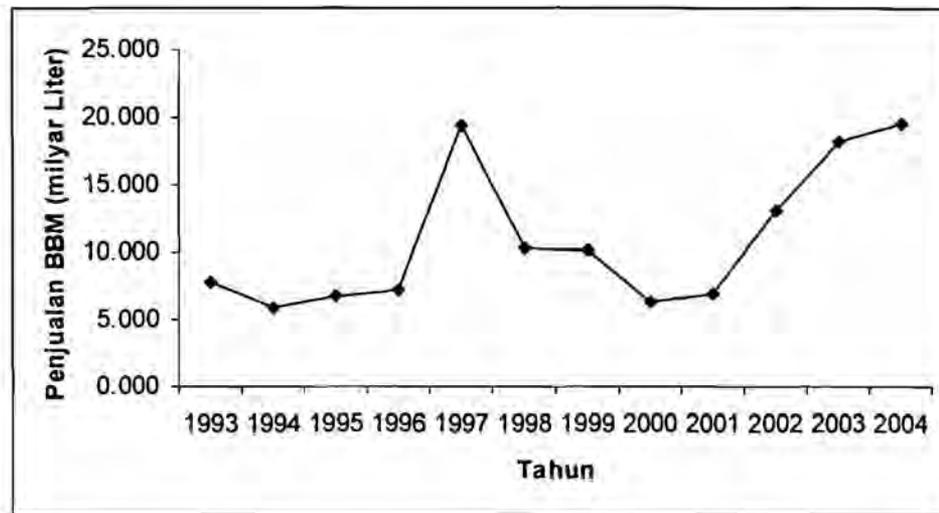


Gambar 26 Produksi listrik (juta kWh) di DKI Jakarta tahun 1990-2004

Peningkatan produksi listrik juga akan meningkatkan konsentrasi ambien gas  $\text{NO}_2$  di udara. Karena produksi listrik akan meningkatkan temperatur. Pada temperatur yang tinggi, gas nitrogen ( $\text{N}_2$ ) dan oksigen ( $\text{O}_2$ ) yang secara alamiah berada dalam jumlah yang cukup besar di atmosfer akan dioksidasi menjadi oksida nitrogen ( $\text{NO}_x$ ). Pengaruh jumlah produksi listrik terhadap konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di udara yang diperoleh dalam penelitian ini berupa persamaan kuadrat.

#### 4. BBM:

Provinsi DKI Jakarta sangat bergantung pada sumber energi yang berasal dari minyak bumi. Gambar 27 memperlihatkan data penjualan BBM di DKI Jakarta yang cenderung meningkat secara signifikan mulai tahun 2001. Dengan kondisi penjualan BBM yang terus meningkat, dapat dimengerti mengapa pencemaran udara di DKI Jakarta juga meningkat.



Gambar 27 Volume penjualan BBM di DKI Jakarta tahun 1993-2004

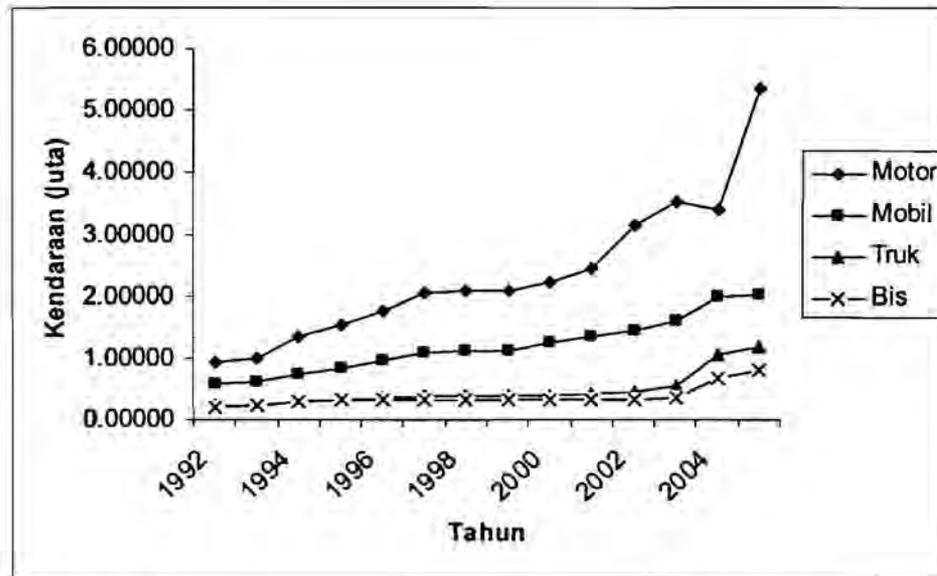
Pengaruh variabel BBM terhadap konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$  di udara tidak linier, melainkan merupakan fungsi kuadrat. Sehingga variabel ini juga perlu ditransformasi, agar parameter yang dihasilkan sesuai dengan teori. Teori menyatakan makin banyak BBM yang digunakan sebagai sumber energi maka akan makin besar konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$  di udara. Hubungan antara jumlah BBM yang tidak linier terhadap konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$  di udara disebabkan karena data penjualan BBM yang diperoleh dalam penelitian ini merupakan data agregat dari seluruh penjualan berbagai jenis BBM di DKI Jakarta. Kandungan Sulfur pada tiap jenis BBM berbeda, yang dapat dilihat dari perbedaan faktor emisinya, sehingga jumlah BBM yang digunakan tidak berbanding lurus dengan konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$ .

Dalam penelitian ini variabel BBM tidak berpengaruh terhadap konsentrasi ambien gas  $\text{NO}_2$  di udara. Konsentrasi gas ini di udara ambien dipengaruhi oleh variabel jumlah kendaraan.

##### 5. Kendaraan:

Meningkatnya pendapatan ditambah dengan berbagai kemudahan yang diberikan beberapa lembaga keuangan telah menyebabkan masyarakat DKI

Jakarta berlomba untuk membeli mobil dan sepeda motor. Data peningkatan jumlah kendaraan bermotor di DKI Jakarta dapat dilihat pada Gambar 28.



Gambar 28 Jumlah kendaraan bermotor yang terdaftar di DKI Jakarta (tidak termasuk TNI, Polri dan Corps Diplomatik)

Kendaraan bermotor merupakan salah satu sumber pencemaran udara yang penting di daerah perkotaan (PE-UI, 2004). Kondisi emisi kendaraan bermotor sangat dipengaruhi oleh kandungan bahan bakar dan kondisi pembakaran dalam mesin. Hasil perhitungan berdasarkan data BPS mengenai emisi yang berasal dari kendaraan bermotor menyatakan bahwa tiap kendaraan rata-rata mengemisikan gas  $\text{SO}_2$  sebesar 0.002555 ton per tahun, sedangkan gas  $\text{NO}_2$  sebanyak 0.033215 ton per tahun. Diharapkan reduksi emisi per kendaraan per kilometer akan dapat tercapai di Jakarta untuk masa mendatang sebagai hasil dari penerapan teknologi dan sistem kontrol emisi. Namun demikian emisi agregat akan tetap tinggi karena jumlah kendaraan yang terus meningkat secara signifikan.

Hasil perhitungan terhadap data jumlah kendaraan bermotor secara umum menyatakan bahwa pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor di DKI Jakarta adalah 13,4 persen per tahun. Nilai pertumbuhan jumlah kendaraan tersebut merupakan nilai yang sangat besar, sehingga di DKI Jakarta kontrol

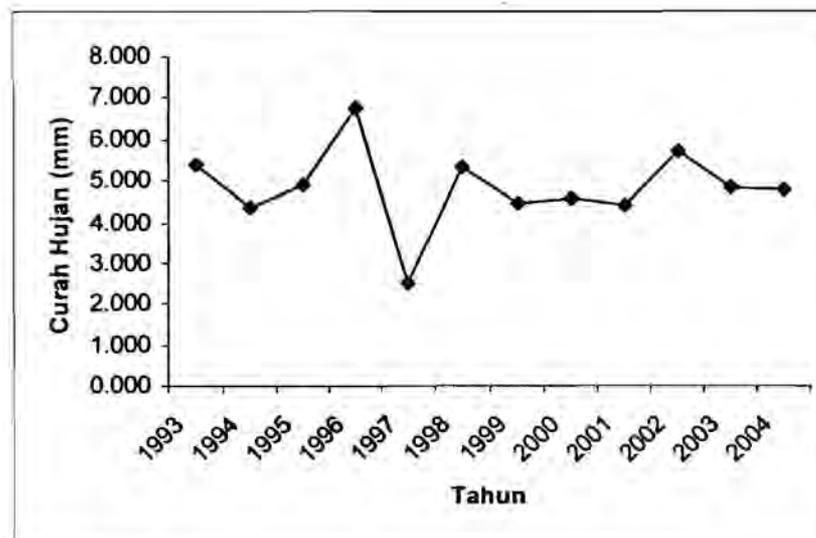
kualitas emisi kendaraan harus diimbangi juga dengan kontrol terhadap jumlah sumber emisi itu sendiri, dalam hal ini volume kendaraan.

Dalam penelitian ini diperoleh bahwa pengaruh variabel kendaraan terhadap konsentrasi ambien gas  $\text{NO}_2$  di udara tidak linier, melainkan merupakan fungsi kubik. Kondisi tersebut menyebabkan variabel ini perlu ditransformasi, agar parameter yang dihasilkan sesuai dengan teori. Teori menyatakan semakin banyak kendaraan yang digunakan sebagai alat transportasi, berarti temperatur udara semakin meningkat, maka akan makin besar konsentrasi ambien gas  $\text{NO}_2$  di udara.

#### 6. Hujan:

Pengaruh curah hujan terhadap pencemaran udara masih dalam perdebatan. Sebagian ahli (Misra dan Tiwari, 1992 serta Howells, 1995) menyatakan bahwa hujan yang jatuh dari awan melalui atmosfer akan mengabsorpsi gas-gas dan partikulat yang terdapat di udara. Di lain pihak Howells (1995) juga menyatakan bahwa hujan yang disertai dengan terjadinya petir akan meningkatkan pencemaran udara yang berupa gas.

Fluktuasi rata-rata curah hujan di DKI Jakarta tahun 1993-2004 dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 29 Rata-rata curah hujan di DKI Jakarta tahun 1993-2004

Hujan di Jakarta pada umumnya disertai dengan terjadinya kilat, oleh karena itu pernyataan Howells bahwa kilat dapat meningkatkan jumlah sulfat dan nitrat di udara sesuai dengan hasil dari model simulasi sistem dinamik pada penelitian ini. Hasil penelitian ini menyatakan peningkatan curah hujan juga akan meningkatkan konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di udara.

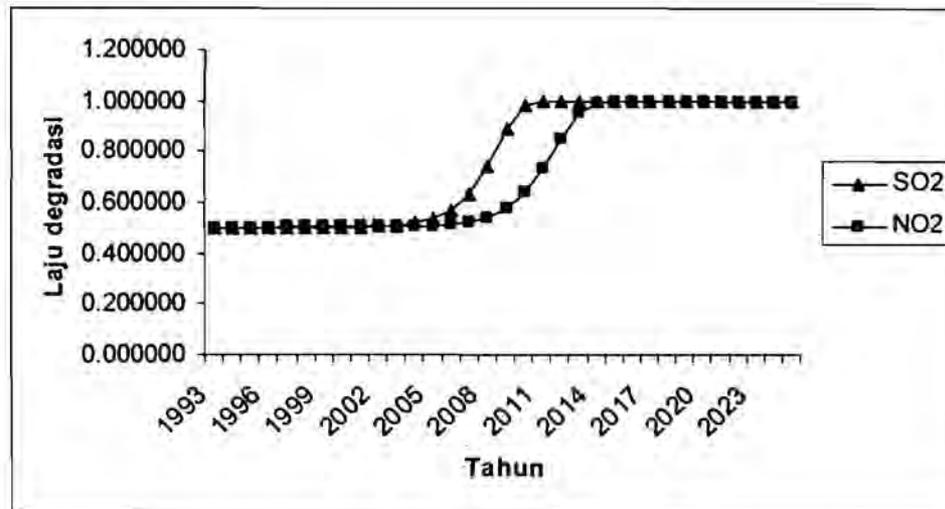
Setelah memahami faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya konsentrasi gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di udara ambien, maka dilakukan pengembangan model simulasi sistem dinamik guna mengestimasi dampak yang ditimbulkan.

#### **5.2.2. Dampak Pencemaran Gas $\text{SO}_2$ dan $\text{NO}_2$ di Udara Ambien Terhadap Kondisi Lingkungan, Sosial, dan Ekonomi**

Meningkatnya konsentrasi gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di udara ambien Jakarta akan menurunkan kualitas udara. Penurunan kualitas lingkungan di Jakarta akibat pencemaran udara dapat dilihat dari terjadinya peningkatan laju degradasi, yang merupakan hasil dari pengembangan model estimasi dengan simulasi sistem dinamik (Lampiran 8 dan 9). Untuk pencemar gas  $\text{SO}_2$  laju degradasi maksimal akan dicapai pada tahun 2013 sedangkan untuk gas  $\text{NO}_2$  akan dicapai tahun 2017. Secara grafis hasil simulasi laju degradasi dapat dilihat pada Gambar 30. Kerusakan lingkungan akibat pencemaran kedua gas dalam penelitian ini dimoneterisasi, dan hasil prediksinya dinyatakan dengan variabel biaya lingkungan yang pada tahun 2013 besarnya adalah Rp.33,716 Milyar, tahun 2017 sebesar Rp.507,979 Milyar, sedangkan pada akhir simulasi (tahun 2025) besarnya adalah Rp.114,486 Triliun.

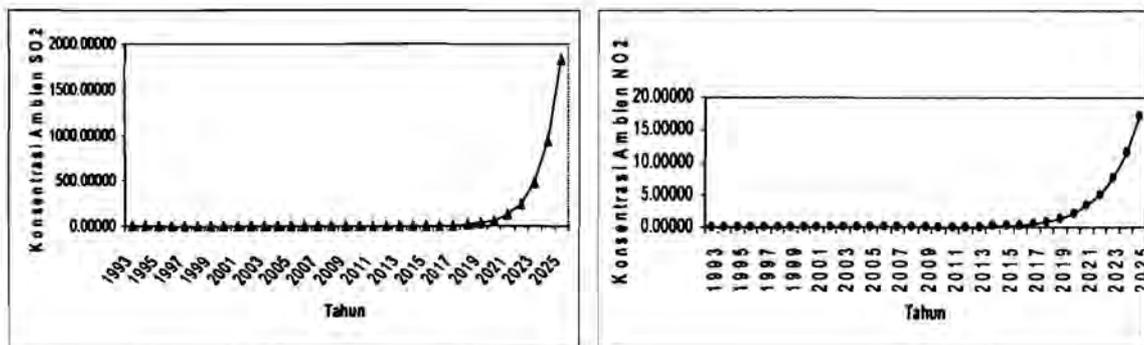
Biaya degradasi lingkungan ini seharusnya diperhitungkan dalam PDRB, sehingga menghasilkan *green* PDRB. Jika pada tahun 2013 PDRB di provinsi DKI Jakarta diprediksi sebesar Rp.103,673 Triliun, maka pengurangan biaya lingkungan sebesar Rp.33,716 Milyar tidaklah signifikan (0,03 persen). Namun bila tidak dilakukan upaya untuk mereduksi gas-gas penyebab deposisi asam, maka pengurangan biaya lingkungan

sebesar Rp.114,486 Triliun terhadap PDRB sebesar Rp.158,483 Triliun pada tahun 2025 merupakan jumlah cukup besar (72,24 persen).



Gambar 30 Dampak pencemaran gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> terhadap laju degradasi

Aspek lingkungan lain yang ditinjau dalam model simulasi sistem dinamik yang dikembangkan adalah konsentrasi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di udara ambien. Hasilnya menyatakan bahwa konsentrasi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di udara ambien DKI Jakarta akan terus meningkat, seperti terlihat pada grafik berikut.



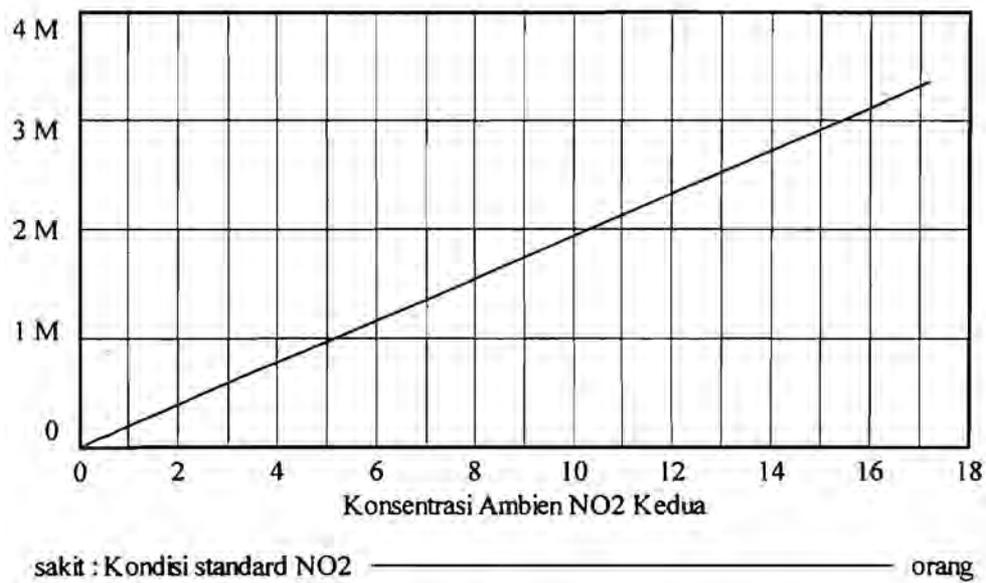
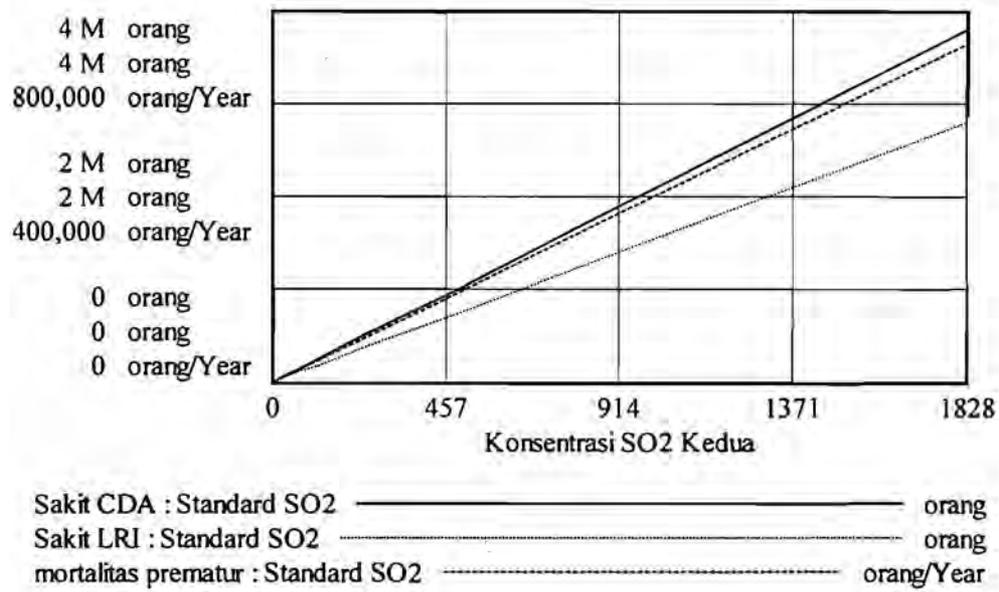
Gambar 31 Prediksi peningkatan konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>

Peningkatan konsentrasi pencemar tersebut akan melampaui baku mutu udara ambien, berdasarkan Keputusan Gubernur DKI No 551 tahun 2001, pada tahun 2008 untuk gas  $\text{SO}_2$  dan tahun 2012 untuk gas  $\text{NO}_2$ . Dilewatinya baku mutu udara ambien ini akan menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap kondisi sosial dan ekonomi.

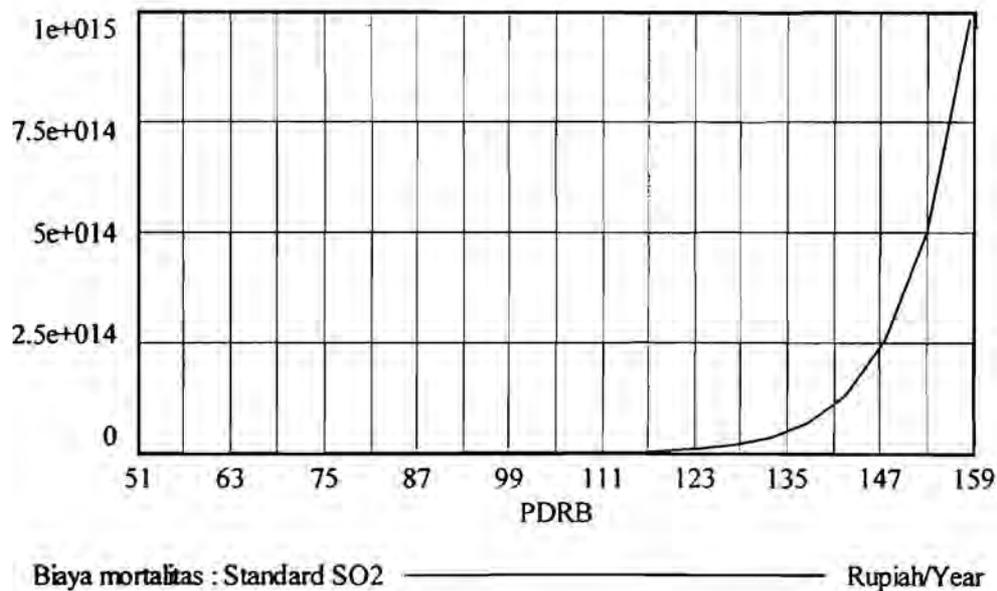
Penurunan kondisi sosial dapat dilihat dari akan adanya sejumlah penduduk DKI yang diprediksi akan terkena penyakit akibat tingginya konsentrasi gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di udara ambien, bahkan diprediksi juga akan ada yang meninggal akibat pencemaran udara oleh gas tersebut. Hasil simulasi sistem dinamik memperlihatkan bahwa konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$  yang melewati baku mutu ambien mulai tahun 2008, akan mengakibatkan adanya 2 orang sakit LRI (*lower respiratory illnesses*) pada anak dan 3 orang sakit CDA (*chest discomfort among adults*), serta seorang meninggal. Jika kondisi tersebut dibiarkan, dalam arti tidak ada tindakan untuk mengurangi pencemaran gas  $\text{SO}_2$ , maka tahun 2025 diprediksi akan ada 2.790.088 orang sakit LRI dan 3.790.993 orang sakit CDA, serta 726.045 orang meninggal.

Sedangkan kelebihan konsentrasi gas  $\text{NO}_2$  terhadap baku mutunya di udara ambien yang dimulai tahun 2012 diprediksi akan menyebabkan terdapat 1.856 orang yang sakit sesak nafas, dan pada akhir masa simulasi (tahun 2025) jumlah tersebut meningkat sampai dengan 1.519.118 orang. Hasil prediksi terhadap kondisi sosial ini terhadap peningkatan konsentrasi ambien kedua pencemar dapat dilihat pada Gambar 32.

Setiap orang yang meninggal prematur akibat pencemaran gas  $\text{SO}_2$  dalam penelitian ini diasumsikan memiliki nilai rupiah sebesar Rp.1.351.440.000,00, nilai ini didasarkan atas perhitungan VOSL (*value of a statistical life*) yang dilakukan oleh Susandi (2004). Jumlah tersebut pada akhir masa simulasi (tahun 2025) diprediksi sebesar Rp.9,81207E+14 atau Rp.981,207 Triliun. Jika nilai ini dibandingkan dengan PDRB DKI Jakarta yang dihasilkan dari model estimasi untuk tahun yang sama yaitu sebesar Rp.158,483 Triliun, maka nilai kematian prematur akibat pencemaran ini sangat tinggi. Hasil simulasi tentang nilai orang yang meninggal prematur akibat pencemaran gas  $\text{SO}_2$  terhadap nilai PDRB dapat dilihat pada Gambar 33.

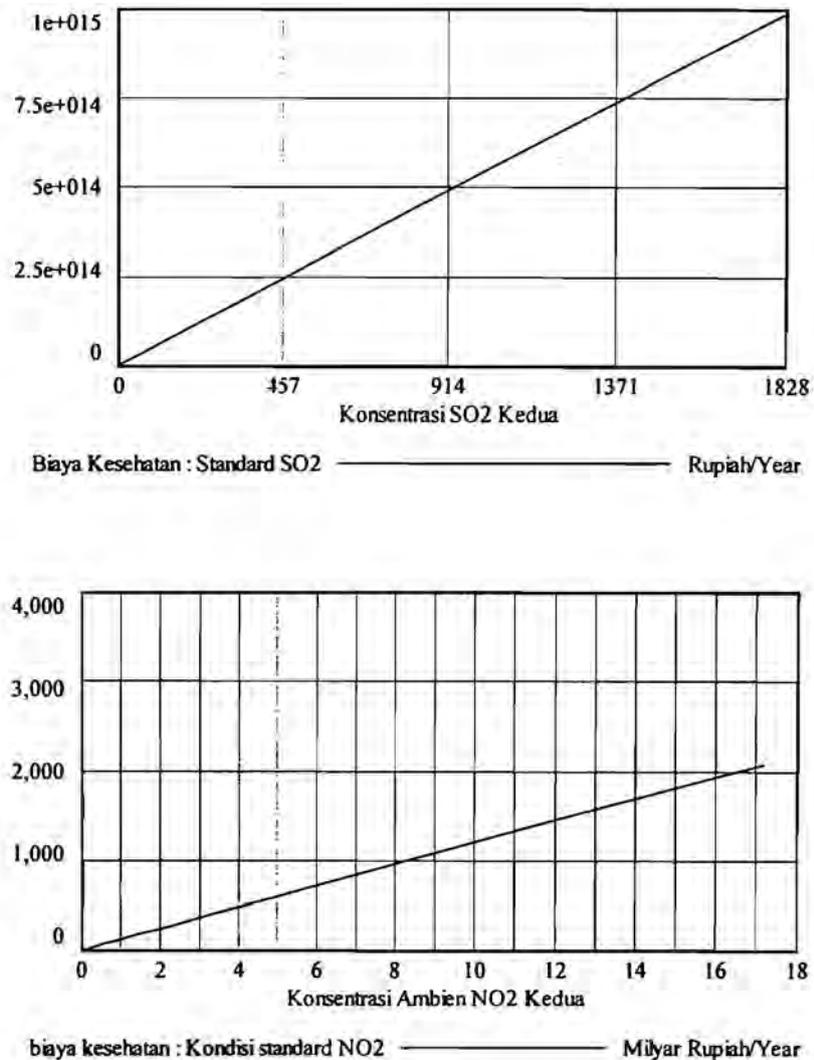


Gambar 32 Prediksi penurunan kondisi sosial akibat pencemaran gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$



Gambar 33 Prediksi nilai orang yang meninggal akibat pencemaran gas  $\text{SO}_2$  terhadap nilai PDRB

Biaya yang harus dikeluarkan untuk mengobati orang yang sakit serta nilai kematian prematur akibat pencemaran gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di udara ambien dalam penelitian ini dinyatakan dalam variabel biaya kesehatan. Secara grafik estimasi biaya kesehatan dapat digambarkan seperti Gambar 34. Pada tahun 2008 diprediksi baru gas  $\text{SO}_2$  yang melebihi BMA, dan biaya kesehatan yang harus dibayarkan oleh penduduk sebesar Rp.698.067.776 atau Rp.698,068 Juta. Pada tahun 2012 gas  $\text{NO}_2$  juga mulai melebihi BMA-nya, sehingga pada tahun tersebut diprediksi biaya kesehatan yang harus dikeluarkan oleh penduduk DKI Jakarta yang sakit berjumlah Rp.1,51665E+11 atau Rp.151,665 Milyar. Pada akhir masa simulasi, tahun 2025, diprediksi biaya kesehatan yang harus dikeluarkan akibat adanya pencemaran kedua gas tersebut adalah Rp.9.85287E+14 atau Rp.985,287 Triliun. Jumlah ini sangat fantastis bila dibandingkan dengan prediksi PDRB pada tahun yang sama, hanya sebesar Rp.158,483 Triliun atau 16 persen dari biaya kesehatan.



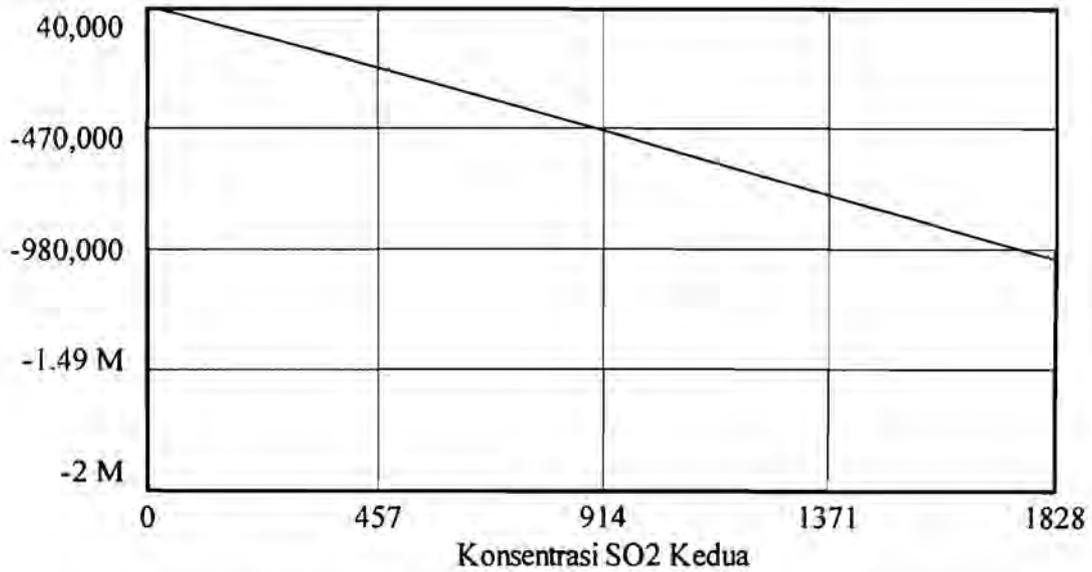
Gambar 34 Prediksi nilai biaya kesehatan akibat pencemaran gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$

Kondisi ini menyatakan bahwa pada akhir masa simulasi (tahun 2025) diprediksi biaya kesehatan yang harus dikeluarkan oleh penduduk DKI Jakarta besarnya lebih dari 5 kali lipat penghasilannya. Prediksi biaya kesehatan tersebut diperoleh dengan asumsi tidak dilakukan tindakan apapun untuk mereduksi pencemaran deposisi asam yang diakibatkan oleh emisi dari pembakaran BBF. Keadaan pada tahun 2025 tentu tidak perlu terjadi, mengingat pada tahun 2004 diprediksi biaya abatement yang perlu dikeluarkan guna mereduksi gas-gas penyebab deposisi asam besarnya hanya 0,08 persen dari PDRB. Prediksi yang dihasilkan dari pengembangan model optimasi maupun model estimasi

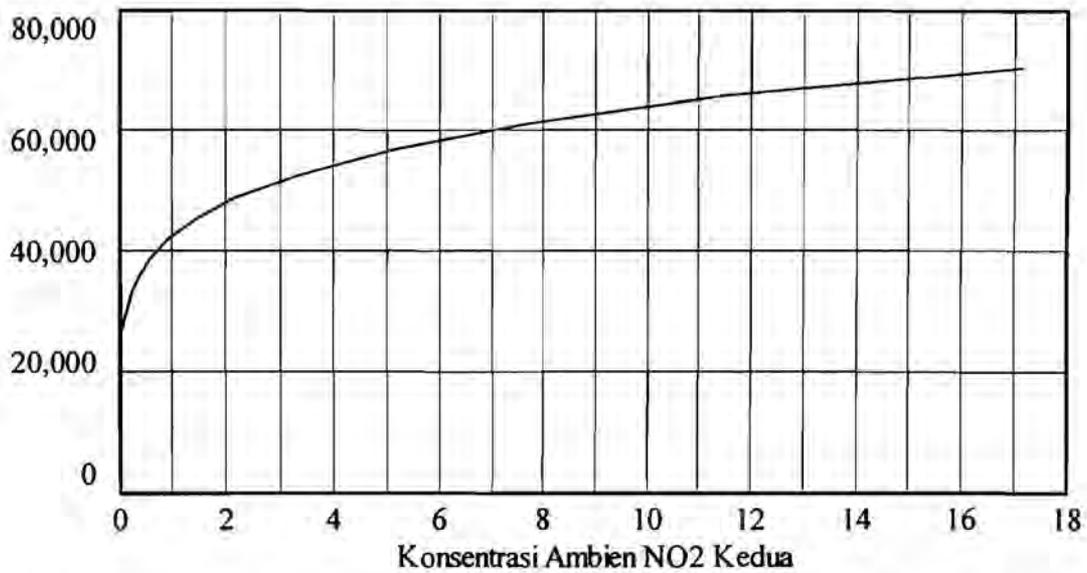
menggambarkan bahwa makin dini pengendalian pencemaran udara dilakukan, maka akan semakin rendah biaya abatement maupun biaya kesehatan yang perlu dikeluarkan.

Selain dari biaya kesehatan, parameter ekonomi yang ditinjau dalam penelitian ini meliputi manfaat bersih dan nilai manfaat bersih sekarang (PVNetben). Nilai manfaat bersih yang diperoleh dari kedua sub-model simulasi sistem dinamik yang dikembangkan pada awalnya selalu sama, tetapi setelah nilai baku mutu ambien terlewati dan terjadi berbagai dampak sosial maka nilai tersebut mulai berbeda (tahun 2009). Nilai manfaat bersih dari sub-model simulasi sistem dinamik untuk gas  $\text{SO}_2$  pada tahun 2009 diprediksi sebesar Rp.2.0841,996094 Milyar atau Rp.20,842 Triliun, sedangkan untuk gas  $\text{NO}_2$  pada tahun yang sama sebesar Rp.2.0854,371094 Milyar atau Rp.20,854 Triliun. Bahkan diakhir masa simulasi (tahun 2025) nilai manfaat bersih ini makin besar perbedaannya, untuk sub-model gas  $\text{SO}_2$  besarnya diprediksi Rp.-1021156,75 Milyar atau merugi Rp.1.021,157 Triliun, sedangkan untuk sub-model  $\text{NO}_2$  sebesar Rp.71466,273438 Milyar atau Rp.71,466 Triliun. Grafik hasil simulasi dari nilai manfaat bersih terhadap konsentrasi ambien kedua pencemar dapat dilihat pada Gambar 35.

Jika nilai manfaat bersih tersebut dihitung pada kondisi sekarang dengan memperhitungkan suku bunga sebesar 5 persen, maka akan diperoleh nilai manfaat bersih pada saat ini (PVNetben). Hasil simulasi PVNetben terhadap konsentrasi ambien kedua pencemar dapat dilihat pada Gambar 36. Hasil simulasi terhadap PVNetben memperlihatkan bahwa pada kondisi seperti sekarang estimasi manfaat bersih yang diperoleh dari nilai penjualan listrik dikurangi dengan biaya kesehatan dan lingkungan akibat pencemaran gas  $\text{SO}_2$  mulai tahun 2021, yaitu pada saat konsentrasi ambien  $\text{SO}_2$  mencapai 126,412842 ppm, akan bernilai negatif. Hal ini tentunya juga berlaku untuk nilai PVNetben. Prediksi nilai manfaat bersih yang negatif menyebabkan perlunya dilakukan *adjustment* terhadap model simulasi yang dikembangkan.

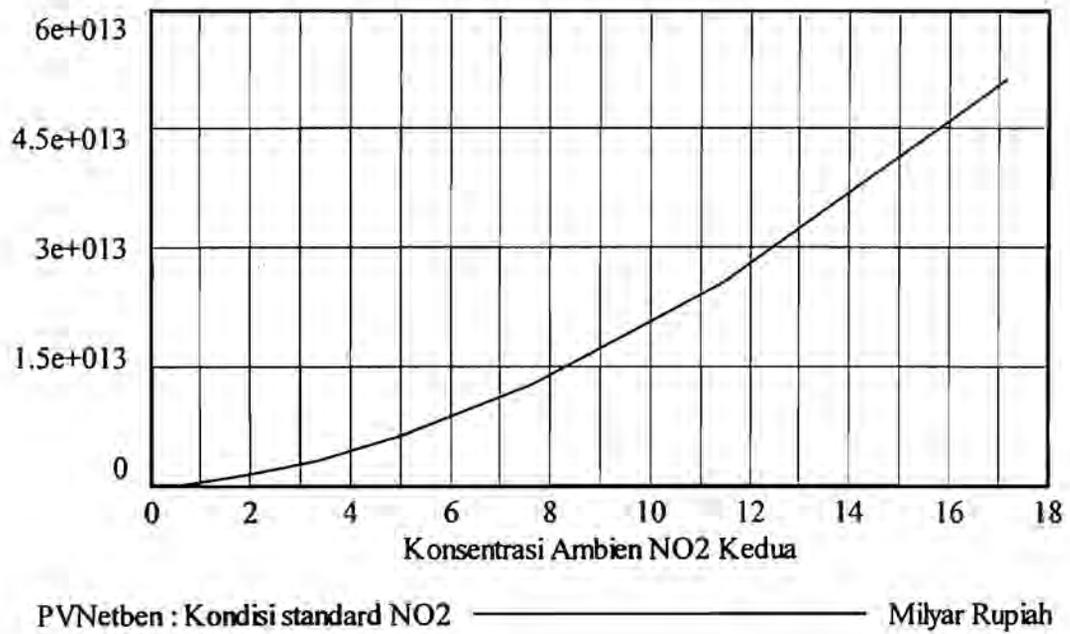
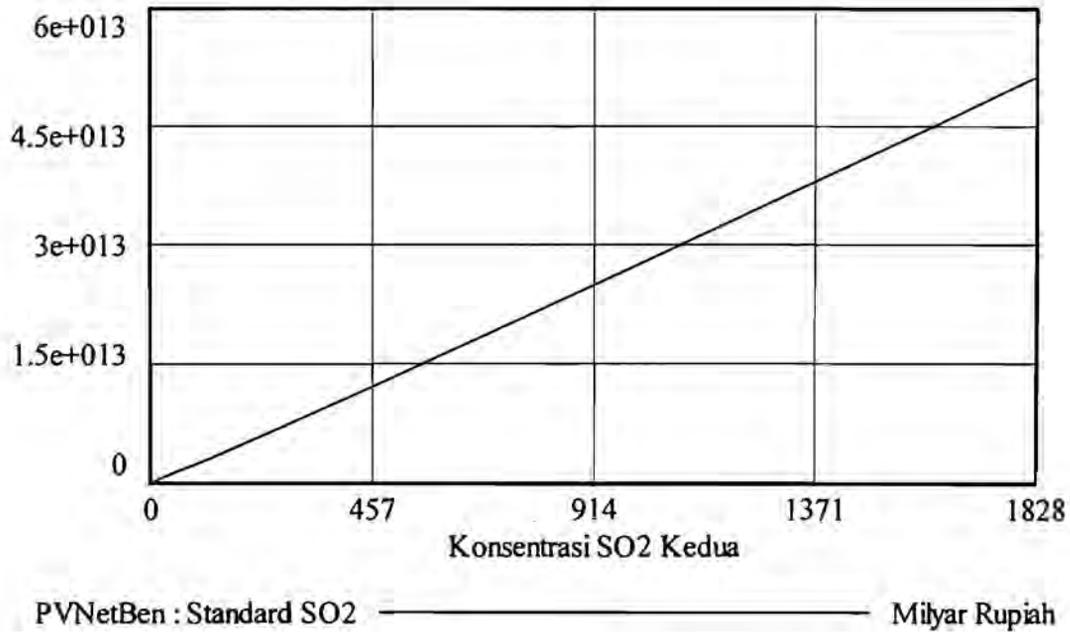


manfaat bersih : Standard SO2 ————— Milyar Rupiah/Year



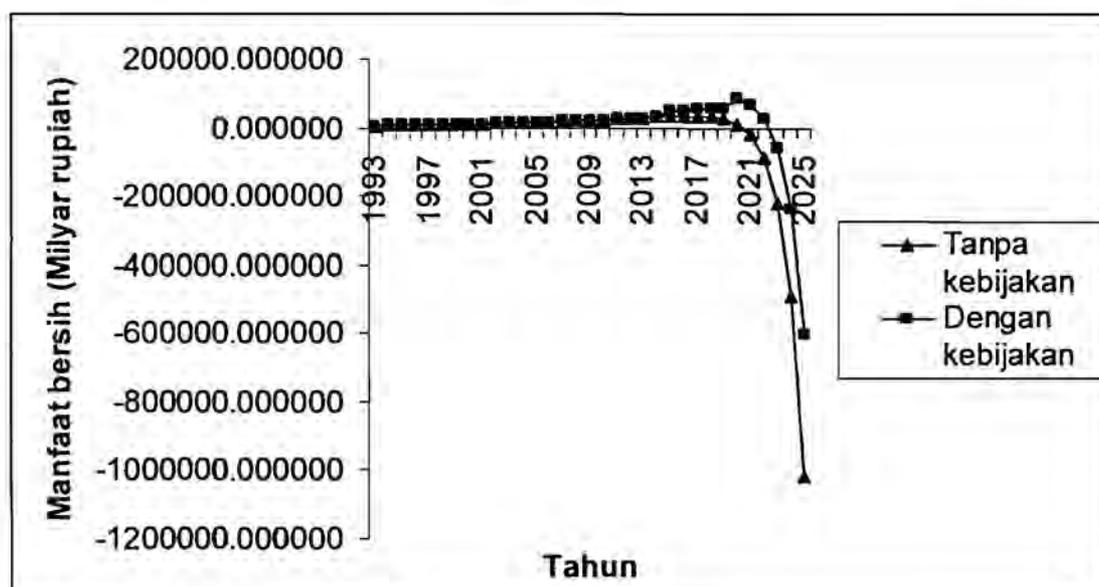
Manfaat bersih : Kondisi standard NO2 ————— Milyar Rupiah/Year

Gambar 35 Prediksi nilai manfaat bersih akibat pencemaran gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>



Gambar 36 Prediksi nilai PVNetben karena pencemaran gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$

Guna mengatasi nilai negatif dari manfaat bersih yang terdapat pada sub-model pencemaran gas  $\text{SO}_2$ , maka dilakukan intervensi struktural dalam sub-model tersebut dengan memberikan variabel kebijakan emisi (kebijakan berbasis lingkungan) dan kebijakan kenaikan harga listrik (kebijakan berbasis ekonomi). Kedua kebijakan tersebut diasumsikan mulai berlaku pada tahun 2015, dan data perbandingan hasil simulasinya dapat dilihat pada Lampiran 13. Sedangkan perbandingan manfaat bersihnya dalam bentuk grafis dapat dilihat pada Gambar 37. Data dan grafik tersebut memperlihatkan bahwa meskipun ada intervensi kebijakan yang diterapkan mulai tahun 2015, namun penurunan nilai manfaat bersih maupun PVNetben kembali terjadi mulai tahun 2020. Hasil simulasi ini mengindikasikan perlunya dilakukan evaluasi dan revisi terhadap kebijakan pengelolaan kualitas udara setiap 5 tahun. Hal ini sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 41 tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara



Gambar 37 Perbandingan prediksi nilai manfaat bersih karena pencemaran gas  $\text{SO}_2$  dengan adanya kebijakan

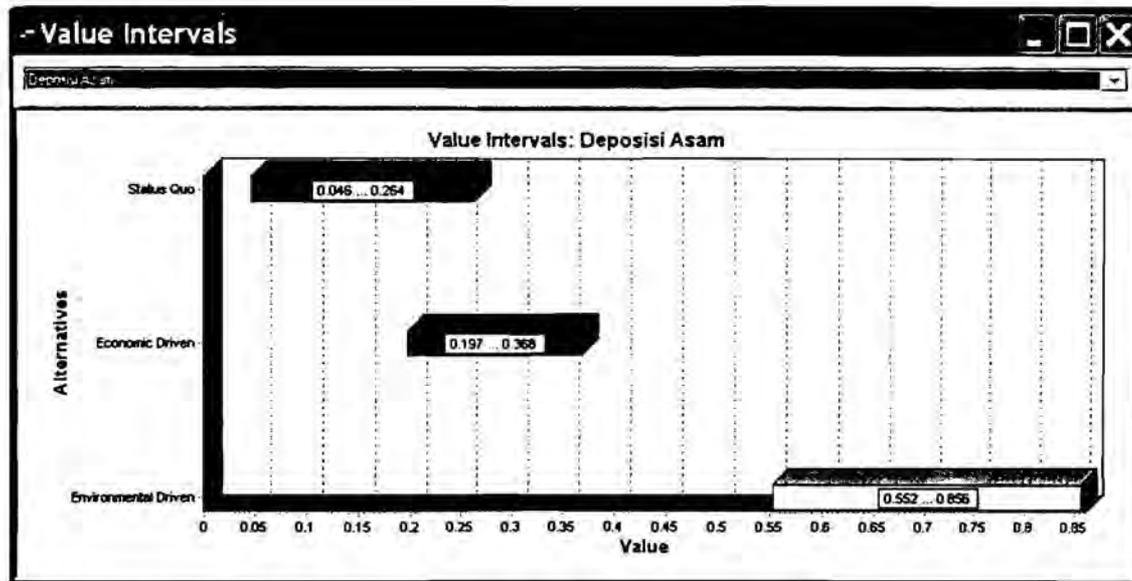
Pengembangan model estimasi dengan metode simulasi sistem dinamik secara umum memperlihatkan kenaikan drastis di akhir masa simulasi, hal ini berlaku umum terhadap suatu prediksi, dimana makin jauh suatu prediksi (makin lama simulasi dilakukan) maka hasilnya akan makin jauh dari kenyataan (dari data riil). Hasil simulasi

yang dilakukan menyatakan bahwa di DKI Jakarta pencemaran udara yang diakibatkan oleh gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  sangat memprihatinkan. Apabila tidak ada tindakan-tindakan pencegahan yang dilakukan, dikhawatirkan kondisi tersebut akan mengacaukan tujuan pembangunan, yaitu untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Untuk itu perlu diterapkan kebijakan yang dapat mengendalikan pencemaran udara, terutama yang berupa gas-gas penyebab deposisi asam. Kebijakan yang diterapkan bertujuan agar pembangunan masih dapat terus dilaksanakan dengan menggunakan BBF sebagai sumber energi tetapi dampak negatif yang berupa deposisi asam dapat diminimalisir. Di bawah ini akan dibahas analisis terhadap pengembangan model alternatif kebijakan untuk mengendalikan pencemaran gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$ .

### **5.3. Analisis Terhadap Hasil Pengembangan Model Alternatif Kebijakan untuk Mengendalikan Dampak Pencemaran Deposisi Asam**

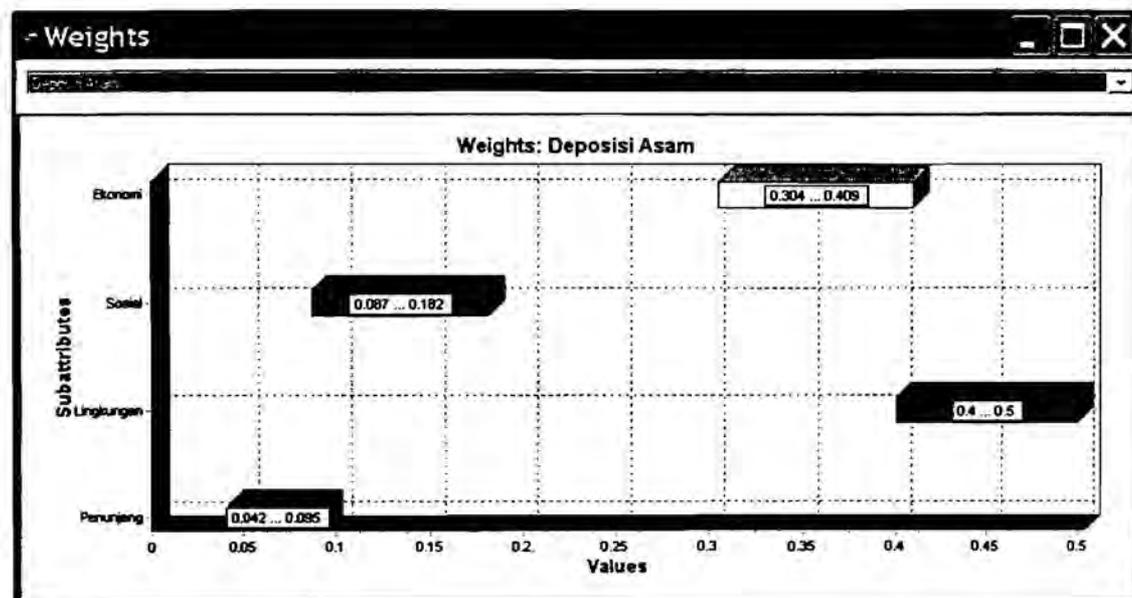
Proses pengembangan model alternatif kebijakan dengan menggunakan perangkat lunak PRIME telah dijelaskan pada bab 4. Output pertama dari pengembangan model alternatif kebijakan berupa *value interval* yang dapat dilihat pada Gambar 38. Dari hasil *value interval* tersebut terlihat adanya tumpang tindih (*overlap*) antara nilai interval pada skenario kondisi saat ini (*status quo*) dan alternatif pembangunan berbasis ekonomi (*economic driven*). Hal ini dapat dipahami karena pembangunan pada saat ini sebenarnya juga berbasis ekonomi, dimana hampir setiap kebijakan yang dikeluarkan pengambil keputusan selalu ditujukan untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi.

Hasil *value interval* yang diperoleh dalam penelitian ini memperlihatkan bahwa alternatif pembangunan yang berbasis lingkungan (*environmental driven*) memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan 2 alternatif basis pembangunan lainnya. Untuk itu perlu dipertimbangkan adanya kebijakan pembangunan yang berprinsip pada kaidah-kaidah lingkungan, karena berdasarkan hasil pengembangan model alternatif kebijakan kondisi pembangunan yang berbasis lingkungan diprediksi akan memiliki *value interval* lebih baik.



Gambar 38 Hasil *value interval*

Output kedua dari pengembangan model alternatif kebijakan untuk mengendalikan pencemaran deposisi asam berupa matriks pembobotan (*weights*), yang dapat dilihat pada Gambar 39. Hasil pembobotan dari model alternatif kebijakan yang dikembangkan memperlihatkan bahwa nilai tertinggi terdapat pada kriteria (*sub-attribute*) lingkungan, berikutnya kriteria ekonomi, yang diikuti kriteria sosial, dan terakhir kriteria



Gambar 39 Hasil *weights* (pembobotan)

penunjang kebijakan. Disini terlihat bahwa untuk melaksanakan pembangunan yang berkelanjutan idealnya faktor lingkungan lebih diprioritaskan dibandingkan dengan faktor ekonomi. Hal ini sesuai dengan apa yang dihasilkan dari pengembangan model optimasi maupun simulasi sistem dinamik yang telah dianalisis sebelumnya, yang menyatakan bahwa dalam jangka panjang pembangunan yang berbasis ekonomi seperti kondisi saat ini akan menyebabkan kerugian pada masyarakat.

Kerugian tersebut terjadi baik terhadap aspek lingkungan dan ekonomi, maupun pada aspek sosial. Pada aspek lingkungan kerugian dapat ditinjau dari terjadinya degradasi lingkungan dan meningkatnya konsentrasi ambien gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di udara. Sedangkan pada aspek ekonomi kerugian dapat dilihat dari meningkatnya biaya kesehatan, biaya lingkungan yang berupa degradasi lingkungan dan biaya abatement, serta menurunnya manfaat bersih. Adapun pada aspek sosial kerugian yang diakibatkan oleh kedua gas penyebab deposisi asam dapat terlihat dari meningkatnya jumlah kematian prematur serta jumlah penderita berbagai penyakit yang disebabkan oleh kedua gas tersebut. Kriteria penunjang kebijakan yang dianalisis pada model ini didasarkan pada *judgement* kualitatif terhadap kemungkinan keterlibatan institusi dan biaya penerapan kebijakan serta kualitas SDM.

Dari hasil pembobotan terlihat bahwa keempat aspek, yaitu: lingkungan, ekonomi, dan sosial, serta penunjang kebijakan berpengaruh terhadap pembangunan. Untuk mengetahui aspek apa yang paling dominan dalam menentukan arah kebijakan pembangunan, maka diperlukan matriks dominan yang merupakan output ketiga dari pengembangan model alternatif kebijakan, seperti dapat dilihat pada Gambar 40. Bulatan merah pada matriks dominan menyatakan bahwa alternatif pada baris didominasi oleh alternatif pada kolom ( $\downarrow$ ). Sedangkan bulatan hijau menunjukkan kebalikannya, yaitu alternatif pada kolom didominasi oleh alternatif pada baris ( $\rightarrow$ ). Sementara itu bulatan abu-abu menunjukkan matriks diagonal yang tidak menyatakan dominasi.

- Dominance			
	Status Quo	Economic Driven	Environmental Driven
Status Quo	●		↓ ●
Economic Driven		●	↓ ●
Environmental Driven	→ ●	→ ●	●

Gambar 40 Hasil matriks dominan

Output matriks dominan yang dihasilkan dari pengembangan model alternatif kebijakan memperlihatkan bahwa skenario pembangunan berbasis lingkungan (*environmental driven*) mendominasi kedua skenario pembangunan lainnya, yaitu pembangunan seperti kondisi sekarang (*status quo*) maupun pembangunan yang dirancang berbasis ekonomi (*economic driven*). Sedangkan kondisi *status quo* juga didominasi oleh skenario pembangunan berbasis ekonomi (*economic driven*), hal ini sesuai dengan hasil pada *value interval* yang menyatakan bahwa kondisi saat ini sebenarnya merupakan kondisi dimana pembangunan didasarkan pada pertumbuhan ekonomi.

Seberapa jauh keuntungan ataupun kerugian yang akan diperoleh jika ketiga alternatif basis pembangunan tersebut akan dilaksanakan dapat dilihat pada output terakhir dari pengembangan model alternatif kebijakan, yaitu *decision rules*. Pada *decision rules* disajikan 4 indikator, yaitu: *maximax*, *maximin*, *central values*, dan *minimax regret*, seperti terlihat pada Gambar 41.

- Decision Rules					
	Maximax	Maximin	Central Values	Minimax Regret	Possible Loss
Status Quo					0.803
Economic Driven					0.656
Environmental Driven	✓	✓	✓	✓	-0.242

Gambar 41 Hasil *decision rules*

Arti dari ke-empat indikator tersebut adalah (Gustafsson, *et al.*, 2001):

1. *maximax*: alternatif yang memiliki nilai kemungkinan terbesar, disebut juga sebagai keputusan optimis dimana diasumsikan bahwa semua kemungkinan nilai berada pada atau dekat dengan batas tertinggi dari *value interval* yang telah disajikan sebelumnya.
2. *maximin*: alternatif yang memiliki nilai kemungkinan terkecil atau keputusan pesimis yang mengasumsikan bahwa jika skenario terburuk terjadi, maka alternatif yang dipilih adalah alternatif yang memiliki nilai batas bawah yang tertinggi.
3. *central value*: alternatif yang memiliki nilai tengah *value-interval* terbesar.
4. *minimax regret*: alternatif yang memiliki *possible loss value* (PLV) terkecil.

Hasil dari *decision rules* memperlihatkan bahwa kemungkinan kerugian yang paling kecil akan diperoleh jika pembangunan diarahkan pada kegiatan yang berbasis lingkungan, kemudian pembangunan barulah ditujukan untuk peningkatan aspek ekonomi. Hal ini ditunjukkan dengan tanda ✓ yang diperoleh dari empat indikator yang ada pada *decision rules*.

Jika skenario *environmental driven* dijadikan sebagai acuan dalam pembangunan, maka *possible loss value* (kemungkinan kerugian ekonomi yang merupakan berkurangnya manfaat ekonomi yang akan diperoleh) sebesar -24,2 persen dari skenario

optimis. Artinya pembangunan berbasis lingkungan yang merupakan alternatif kebijakan terbaik, karena jika skenario ini yang diambil maka akan diperoleh keuntungan minimal sebesar 24,2 persen dibandingkan jika alternatif pembangunan lainnya yang akan dilaksanakan.

Pada skenario *economic driven* atau aspek ekonomi yang dijadikan sebagai tulang punggung pembangunan, maka kemungkinan kerugian ekonomi yang merupakan berkurangnya nilai manfaat ekonomi akan diperoleh sebesar 65,6 persen dari skenario optimis. Sedangkan jika skenario status quo atau kondisi pembangunan seperti yang sekarang berlangsung tetap dilakukan, maka kerugian ekonominya diprediksi dapat mencapai 80,3 persen dari kondisi optimis. Dari hasil analisis tersebut dapat disimpulkan bahwa jika pembangunan mengalami kegagalan, maka pembangunan yang didasarkan pada kaidah-kaidah lingkungan akan mengalami kerugian yang relatif kecil, bahkan menguntungkan (24,2 persen) dibandingkan pembangunan yang mengacu pada keinginan untuk memperoleh manfaat ekonomi sebesar-besarnya yang diprediksi akan mengakibatkan kerugian sebesar 65,6 persen.

Secara umum pengembangan model alternatif kebijakan menghasilkan bahwa kebijakan pembangunan yang berbasis lingkungan lebih baik dibandingkan dengan kebijakan yang berbasis ekonomi, padahal basis pembangunan pada saat ini berbasis ekonomi. Untuk itu perlu diterapkan kebijakan pembangunan yang berbasis lingkungan. Kebijakan pembangunan yang berbasis lingkungan hendaknya dapat diterapkan sedini mungkin, karena hasil pengembangan model optimasi maupun simulasi menyatakan bahwa makin lama pencemaran deposisi asam tidak direduksi maka biaya yang harus dikeluarkan akan semakin mahal. Biaya tersebut berupa biaya kerusakan lingkungan dan ongkos pengobatan akibat menurunnya kondisi kesehatan masyarakat.

Bab ini telah menjabarkan analisis terhadap model-model yang dikembangkan dalam penelitian. Hasil analisis terhadap pengembangan model menyatakan perlunya diterapkan kebijakan berbasis lingkungan guna mereduksi pencemaran deposisi asam. Untuk mengetahui kebijakan apa yang disarankan akan diberlakukan, maka diberikan analisis kebijakan pada bab berikut.

## VI. ANALISIS KEBIJAKAN

Hasil pengembangan model alternatif kebijakan pada penelitian ini menyatakan bahwa pembangunan yang sekarang dilaksanakan (skenario status quo) berbasis ekonomi, sedangkan kondisi ideal akan diperoleh jika pembangunan didasarkan pada kaidah-kaidah lingkungan. Untuk mencapai kondisi ideal ini tentunya diperlukan analisis terhadap kebijakan yang sekarang ada, serta upaya-upaya apa yang perlu dilaksanakan guna mencapai kondisi pembangunan yang ideal.

Kebijakan lingkungan udara yang sekarang berlaku di Indonesia, tertuang dalam UU No. 23/1997 dan PP No. 41/1999, serta kebijakan Pemprov DKI Jakarta dalam KepGub No. 551/2001 dan Perda No. 2/2005. Kedua kebijakan tersebut menggunakan pendekatan perintah dan kendalikan (*command and control*). Kebijakan lingkungan tersebut berupa penetapan BMA dan BME bagi parameter-parameter yang dianggap dapat berdampak negatif jika nilai BMA-nya dilampaui. Penelitian ini menghasilkan prediksi bahwa emisi dan konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> akan terus meningkat, sehingga dapat dikatakan kebijakan-kebijakan tersebut belum berfungsi secara maksimal dalam mendorong reduksi emisi dari parameter-parameter pencemar udara, termasuk gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>. Hal ini disebabkan kebijakan lingkungan yang berbasis perintah dan kendalikan adakalanya berbenturan dengan kegiatan ekonomi (Wolfgang, 2001). Sehingga kebijakan lingkungan dengan pendekatan *command and control* perlu dikombinasi dengan pendekatan ekonomi agar kepentingan ekonomi dan lingkungan bisa sejalan yang akhirnya mendorong perbaikan kondisi sosial.

Perbaikan kondisi ini diharapkan berupa perubahan perilaku masyarakat, khususnya dalam efisiensi penggunaan BBF sebagai sumber energi, yang pada akhirnya dapat mengurangi emisi polutan. Adapun upaya-upaya yang harus dilaksanakan guna mencapai kondisi pembangunan yang ideal, secara umum dapat dilihat pada matriks kebijakan berikut.

Tabel 18 Matriks usulan kebijakan sebagai upaya menuju kondisi pembangunan ideal

Instrumen	Target	Hasil yang diharapkan	Siapa yang menerima	Siapa yang membayar	Tingkat implementasi
<b>Instrumen ekonomi (IE):</b>					
1. Harga BBF	Harga BBF yang sudah memperhitungkan pentingnya konversi sda ireversibel (BBF) ke sda reversibel	Masyarakat tidak berlebihan dalam menggunakan BBF sbg sumber energi	Pemerintah pusat	Pengguna BBF	Dapat dilaksanakan 100%, karena pemerintah memiliki kewenangan penuh dalam menentukan harga BBF
2. Denda	Kegiatan yang mengemisikan gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> tidak melebihi BME-nya	BME yang ditetapkan ditaati oleh pelaku kegiatan emisi	Pemerintah daerah	Kegiatan yang mengemisikan gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> yang melebihi BME-nya, seperti industri dan kendaraan bermotor pribadi	Pelaksanaan relatif sulit karena diperlukan sistem kontrol yang cukup ketat, seperti: monitoring emisi industri dan uji emisi kendaraan bermotor
3. Pajak	Harga BBF yang sudah memperhitungkan biaya abatemen untuk mereduksi gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub>	Masyarakat tidak berlebihan dalam menggunakan BBF sbg sumber energi	Pemerintah pusat	Pengguna BBF, yang dibedakan antara pelaku industri, pengguna kendaraan, dan rumah tangga	Dapat dilaksanakan 100%, karena pemerintah memiliki kewenangan penuh dalam menentukan pajak dan harga BBF

Tabel 18 (lanjutan)

<b>Instrumen</b>	<b>Target</b>	<b>Hasil yang diharapkan</b>	<b>Siapa yang menerima</b>	<b>Siapa yang membayar</b>	<b>Tingkat implementasi</b>
4. Subsidi	Terjadi pengurangan penggunaan kendaraan bermotor, sehingga kemacetan dan pencemaran udara menurun	Masyarakat ekonomi lemah mendapat subsidi dari penggunaan alat transportasi tanpa BBM	Masyarakat, terutama yang menggunakan alat transportasi tanpa BBM	Pemerintah Provinsi DKI Jakarta	Membutuhkan monitoring yang cukup ketat dan harus didahului dengan penyediaan infrastruktur
<b>Lingkungan (CAC):</b>					
1. BMA	Nilai BMA gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> yang spesifik untuk wilayah DKI Jakarta. Jika nilai ini tidak dilampaui maka tidak ada dampak negatif	Masyarakat tidak mengalami dampak negatif dari konsentrasi gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> yang berlebihan di udara ambien	Masyarakat, terutama yang rentan terhadap pencemaran gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> di udara ambien	Kegiatan yang mengemisikan gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> ke udara ambien, seperti industri dan kendaraan bermotor	Pelaksanaan relatif sulit, karena kurangnya data dan SDM berkualitas yang dapat menetapkan BMA berbasis fungsi dose-respons
2. BME	Nilai BME gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> yang spesifik untuk wilayah DKI Jakarta, yang ditentukan berdasarkan kondisi emisi yang efisien	Nilai BME gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> dipenuhi tetapi kegiatan ekonomi masih tetap dapat berlangsung	Masyarakat yang berada di sekitar sumber emisi	Kegiatan yang mengemisikan gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> dan melebihi BME-nya, seperti industri dan kendaraan bermotor pribadi	Pelaksanaan relatif sulit, karena kurangnya data dan SDM berkualitas yang dapat menetapkan BME berbasis kondisi emisi yang efisien

Tabel 18 (lanjutan)

Instrumen	Target	Hasil yang diharapkan	Siapa yang menerima	Siapa yang membayar	Tingkat implementasi
<b>Sosial:</b>					
1. Transportasi	Tidak terjadi kemacetan yang menyebabkan polusi udara meningkat	Kegiatan transportasi tidak menyebabkan konsentrasi gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> di udara melebihi BMA	Pengguna jasa transportasi	Pemerintah daerah dan pemilik kendaraan bermotor	Pelaksanaan harus diawali dengan penataan sistem transportasi, terutama transportasi publik, dan penyediaan infrastruktur
2. Industri	Kegiatan industri tidak meningkatkan polusi udara	Kegiatan industri tidak menyebabkan konsentrasi gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> di udara melebihi BMA	Masyarakat yang berada di sekitar areal industri	Pelaku kegiatan industri	Pihak industri harus diberi pemahaman bahwa polusi udara akan menurunkan tingkat keuntungan
3. Rumah Tangga	Kegiatan dalam rumah tangga tidak menyebabkan polusi udara meningkat	Aktivitas dalam rumah tangga tidak menyebabkan konsentrasi gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> di udara melebihi BMA	Masyarakat, terutama yang rentan terhadap pencemaran gas SO <sub>x</sub> dan NO <sub>x</sub> di udara ambien	Masyarakat	Harus diawali dengan sosialisasi kepada seluruh lapisan masyarakat mengenai pentingnya menjaga kualitas udara

Tabel 18 (lanjutan)

Instrumen	Target	Hasil yang diharapkan	Siapa yang menerima	Siapa yang membayar	Tingkat implementasi
<b>Penunjang:</b>					
1. Kelembagaan	Lembaga-lembaga terkait dapat menjalankan fungsinya dalam mengelola kualitas udara	Terdapat koordinasi yang baik antar lembaga dalam mengelola kualitas udara	Pelaku kegiatan yang mengemisikan pencemar ke udara, seperti pelaku kegiatan industri dan transportasi	Pemerintah pusat dan pemerintah daerah	Bergantung pada <i>political will</i> pemerintah pusat dan daerah
2. SDM	SDM yang terkait dapat menjalankan fungsinya dalam mengelola kualitas udara	Terdapat sejumlah SDM yang berkualitas dalam mengelola kualitas udara	Lembaga yang terkait dengan pengelolaan kualitas udara, baik di tingkat pusat maupun daerah	Pemerintah pusat dan pemerintah daerah	Bergantung pada <i>political will</i> pemerintah pusat dan daerah
3. Dana	Pemprov DKI Jakarta mengalokasikan dana yang cukup untuk mengelola kualitas udara	Kualitas udara di DKI Jakarta sesuai dengan BMA yang ditetapkan	Lembaga yang terkait dengan pengelolaan kualitas udara di DKI Jakarta	Pemerintah provinsi DKI Jakarta	Bergantung pada <i>political will</i> pemerintah provinsi DKI Jakarta

Untuk itulah model pengembangan alternatif kebijakan dalam penelitian ini ditinjau dari 4 aspek, yaitu: ekonomi, lingkungan, dan sosial, serta penunjang kebijakan. Kebijakan berbasis ekonomi yang dianalisis dalam disertasi ini berupa penentuan harga energi dan instrumen ekonomi lainnya yang mungkin digunakan untuk mengelola pencemaran udara. Sedangkan analisis terhadap kebijakan lingkungan berupa kebijakan berbasis CAC, yaitu penetapan BME dan BMA. Kegiatan transportasi, industri dan aktivitas dalam rumah tangga termasuk dalam kegiatan sosial yang dianalisis. Adapun aspek instrumen penunjang yang dianalisis berupa kelembagaan, SDM, dan biaya penerapan peraturan.

### 6.1. Ekonomi

Kegiatan ekonomi dapat dianggap sebagai pendorong meningkatnya pencemaran, seperti yang disampaikan Fauzi (2004) bahwa pencemaran merupakan fenomena yang *pervasive* akibat adanya aktivitas ekonomi. Stern (2004) mengemukakan bahwa keinginan manusia untuk meningkatkan kualitas hidup selalu diikuti dengan peningkatan kebutuhan energi. Pada umumnya peningkatan kualitas hidup ditandai dengan peningkatan kegiatan ekonomi yang membutuhkan energi, namun energi yang diperoleh melalui pembakaran BBM juga menghasilkan sejumlah pencemar ke udara. Karena itulah pengembangan kebijakan untuk mengendalikan pencemaran udara tidak dapat mengabaikan aspek ekonomi.

Pada bab 2 disertasi ini telah dijabarkan mengenai beberapa jenis instrumen ekonomi yang dapat digunakan untuk mengelola lingkungan, seperti: denda, pajak, dan ijin mencemari atau TDP (*transferable discharge permit*). Di samping ketiga jenis instrumen ekonomi tersebut, sebenarnya terdapat instrumen ekonomi lain yang berupa subsidi.

Subsidi telah diberikan oleh Pemerintah kepada BBM, agar masyarakat tidak terlalu dibebani oleh harga BBM yang terus meningkat. Tetapi subsidi BBM tidak mendorong masyarakat untuk menggunakan sumber energi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan BBM, karena harga BBM bersubsidi relatif lebih rendah dibandingkan dengan sumber energi lainnya. Subsidi BBM ini mengakibatkan

masyarakat, terutama golongan ekonomi kuat, relatif boros dalam menggunakan BBM. Padahal penelitian ini membuktikan salah satu faktor yang menyebabkan peningkatan konsentrasi gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> di udara ambien adalah penggunaan minyak bumi sebagai sumber energi. Menyadari hal ini dan untuk mengurangi beban subsidi BBM pada akhirnya pemerintah menaikkan harga BBM dan mulai menggiatkan pengembangan bahan bakar alternatif.

Dengan meningkatnya harga BBM dunia, maka pengembangan bahan bakar alternatif dirasakan semakin mendesak. Setelah dikeluarkannya Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional pengembangan bahan bakar alternatif mulai digalakkan, terutama pengembangan bahan bakar nabati. Sebenarnya selain bahan bakar nabati, Indonesia juga memiliki berbagai sumber energi yang ramah lingkungan seperti tenaga surya, panas bumi, energi angin, dan tenaga air. Untuk mengurangi ketergantungan terhadap BBM sudah saatnya digunakan sumber-sumber energi alternatif tersebut agar pencemaran udara tidak semakin meningkat. Penetapan harga BBM dapat digunakan sebagai salah satu cara untuk mendorong penggunaan energi alternatif.

Kebijakan penetapan harga energi seperti Kepres No. 104/2003 tentang Harga Jual Tenaga Listrik dan Peraturan Presiden No. 22/2005 tentang Harga Jual Eceran BBM Dalam Negeri dapat digunakan untuk mengatasi ketergantungan terhadap BBM serta mengurangi pencemaran udara. Kebijakan penetapan harga energi tentunya didahului dengan kajian akademik, yang salah satu dasar pemikirannya adalah perlunya dilakukan konversi sumber energi dari sumberdaya alam yang tidak dapat pulih (*irreversible*) ke sumberdaya alam yang dapat pulih (*reversible*). Yang perlu diingat dalam kajian kebijakan penetapan harga energi adalah pentingnya memprioritaskan aspek lingkungan, karena kebijakan yang mengutamakan aspek ekonomi semata akan merugikan, seperti hasil yang diperoleh pada penelitian ini dalam model alternatif kebijakan.

Kebijakan subsidi BBM maupun kebijakan penetapan harga energi merupakan kebijakan yang berlaku secara nasional, karena itu Pemprov DKI seyogyanya dapat berkolaborasi dengan pemerintah pusat dalam penerapan kebijakan tersebut. Kedua kebijakan tersebut berdampak cukup besar bagi penggunaan BBM sebagai sumber energi. Jika kedua kebijakan tersebut tidak dilakukan secara cermat, maka biaya untuk mereduksi

pencemaran yang diakibatkan oleh emisi polutan dari peningkatan penggunaan BBM akan semakin besar.

Hasil dari model alternatif kebijakan yang dikembangkan dengan metode analisis multi kriteria didukung oleh model optimasi yang dikembangkan dengan metode *goal programming* yang memperlihatkan bahwa pada kondisi seperti sekarang biaya yang harus dikeluarkan untuk mereduksi emisi kedua gas penyebab polusi deposisi asam sebesar Rp.2,008 Milyar per tahun. Biaya untuk mereduksi emisi pencemar atau biaya abatement tentunya harus dikeluarkan oleh institusi yang mengemisikan pencemar, dalam bentuk penggunaan teknologi yang tepat maupun penggantian jenis bahan baku dan bahan bakar yang lebih ramah lingkungan.

Sampai saat ini, sistem insentif bagi industri yang menurunkan emisi polutannya secara signifikan dan kontrol terhadap emisi industri belum diterapkan. Akibatnya hanya industri-industri besar yang memerlukan label ramah lingkungan untuk kepentingan pemasaran dan ekspor produknya yang berusaha untuk melakukan pengelolaan lingkungan, hal ini dilakukan lebih karena kebutuhan pasar dan bukan karena usaha untuk mentaati peraturan, apalagi kesadaran untuk menjaga kualitas lingkungan. Kondisi ini memperlihatkan bahwa perlu dikembangkan kebijakan lingkungan yang berbasis kebutuhan pasar berupa instrumen ekonomi.

Salah satu bentuk instrumen ekonomi adalah subsidi. Jika subsidi BBM dianggap dapat meningkatkan pencemaran udara, maka subsidi bagi pengguna alat transportasi yang tidak menggunakan BBM dapat dijadikan alternatif dalam upaya mereduksi pencemaran udara. Hal ini akan dibahas lebih lanjut pada sub-bab kebijakan sosial mengenai kegiatan transportasi. Sedangkan pada sub-bab ini ketiga instrumen ekonomi lain yang biasa digunakan untuk mengendalikan pencemaran udara dianalisis kemungkinan penerapannya di Indonesia, khususnya di provinsi DKI Jakarta.

Instrumen ekonomi yang pertama berupa denda. Denda dapat dibebankan kepada pelaku ekonomi yang kegiatannya dianggap mengemisikan polutan dan telah melewati BME. Jumlah denda yang dibebankan kepada pelaku kegiatan emisi didasarkan pada kuantitas polutan yang diemisikan. Kuantitas polutan dapat ditetapkan berdasarkan selisih antara emisi dikurangi BME dan lamanya kelebihan emisi terjadi. Mengingat BME

dijadikan acuan dalam penetapan denda, maka instrumen ekonomi berupa denda baru dapat diterapkan setelah pemerintah menetapkan BME.

Penetapan BME dalam kaitannya dengan kegiatan ekonomi, idealnya mengikuti Gambar 2 pada bab Tinjauan Pustaka yang menjelaskan tentang tingkat pencemaran yang efisien. Penerapan kebijakan berupa denda tidak mudah dilaksanakan. Tiap wilayah dengan jumlah sumber emisi dan kondisi iklim yang berbeda akan memiliki standar emisi maksimum yang berbeda. Hal ini akan menyulitkan institusi yang harus melakukan kontrol terhadap emisi dari tiap-tiap kegiatan. Untuk mengurangi kesulitan dan biaya monitoring jika kebijakan ini diterapkan, maka pengukuran terhadap emisi tidak perlu dilakukan secara langsung melainkan melalui prediksi kecepatan emisi dengan menggunakan persamaan (2.5).

Guna mereduksi emisi pencemar, instrumen ekonomi kedua yang berupa pajak juga dapat dikenakan kepada setiap kegiatan yang mengemisikan pencemar ke udara. Pajak ini dapat dibebankan pada input produksi, baik yang berupa bahan baku maupun bahan bakar yang dianggap akan mengemisikan pencemar ke udara. Penerapan kebijakan berupa pajak relatif mudah, karena kontrolnya dapat dilakukan melalui jumlah penjualan bahan baku dan bahan bakar yang akan mengemisikan pencemar. Di Perancis, Polandia, Hungaria, dan Rusia pajak lingkungan dikembalikan lagi kepada masyarakat untuk perbaikan lingkungan, jenis pajak seperti ini disebut sebagai *ear marked tax* (World Bank Group, 1998 serta Millock dan Nauges, 2006). Namun demikian struktur pajak di Indonesia belum memungkinkan hasilnya untuk melakukan abatemen terhadap kerusakan lingkungan yang diakibatkan oleh emisi pencemar. Hasil pajak yang dikumpulkan oleh pemerintah digunakan untuk berbagai kepentingan, yang adakalanya tidak berhubungan dengan sumber pajak.

Instrumen ekonomi ketiga yang berupa ijin emisi yang dapat diperjual-belikan (*Transferable Discharge Permit* atau TDP) merupakan salah satu bentuk instrumen ekonomi yang dapat digunakan untuk mereduksi emisi pencemar ke udara. Ijin tersebut relatif sulit diterapkan di Indonesia, karena memerlukan biaya yang cukup tinggi untuk mengontrol emisi dari setiap kegiatan maupun transaksi antar pemilik dan pembeli TDP. Pengalaman di Amerika terdapat institusi bahkan perorangan yang membeli TDP sebagai ijin mengemisikan Sulfur, padahal yang bersangkutan tidak memiliki kegiatan yang

mengemisikan pencemar tersebut. Alasannya membeli TDP hanya untuk mencegah peningkatan polusi di wilayah tertentu (Field dan Field, 2002). Jika hal ini terjadi tentunya aktivitas ekonomi yang benar-benar membutuhkan ijin tersebut akan terganggu. Secara umum Fauzi (2004) menyatakan bahwa sebelum menerapkan TDP maka dimensi teknis, finansial, dan legal harus ditata terlebih dahulu.

Dari kajian terhadap keempat instrumen ekonomi yang mungkin digunakan untuk mengelola pencemaran hujan asam di provinsi DKI Jakarta dapat dikatakan denda, pajak dan subsidi merupakan 3 instrumen yang dapat diterapkan. Dari matriks usulan kebijakan sebagai upaya menuju kondisi pembangunan ideal, terlihat bahwa selain dari instrumen ekonomi, tentunya diperlukan kebijakan lingkungan untuk menjaga kualitas udara DKI Jakarta.

## **6.2. Lingkungan**

Kebijakan lingkungan yang di analisis pada bagian ini adalah kebijakan yang berbasis perintah dan kendalihan (CAC). Lingkungan sebagai reseptor dari berbagai pencemaran, termasuk pencemaran deposisi asam. Terjadinya pencemaran ini ditandai dengan adanya kelebihan konsentrasi gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  di udara ambien. Kondisi udara ambien yang berkontak langsung dengan reseptor harus dijaga kualitasnya, karena itu perlu ditentukan BMA (baku mutu udara ambien). Idealnya BMA ditetapkan berdasarkan kondisi reseptor, dimana pada konsentrasi pencemar di bawah BMA dianggap tidak ada reseptor yang menerima dampak negatif pencemar. Secara umum BMA ditetapkan berdasarkan fungsi dose-respons, yaitu penentuan konsentrasi atau dosis yang dianggap tidak terdapat respons negatif terhadap reseptor.

Penetapan BMA untuk berbagai pencemar udara di Indonesia belum didasarkan atas studi dosis respon pencemaran udara terhadap kesehatan masyarakat, karena BMA yang berlaku di Indonesia relatif sama dengan BMA nasional AS (Callan dan Thomas, 2000). Nilai BMA yang diadopsi dari wilayah lain bahkan negara lain sebenarnya tidak dapat dilakukan untuk polutan yang mencemari udara, karena pencemaran udara sangat spesifik terhadap ruang dan waktu (Field dan Field, 2002 serta Soedomo, 2001). Selain itu kondisi fisik reseptor di Indonesia umumnya dan DKI Jakarta khususnya tentu

berbeda dengan kondisi reseptor AS. Namun demikian pengembangan BMA memerlukan biaya yang sangat mahal, sehingga adopsi nilai BMA dari negara lain dapat dilakukan dengan alasan ini.

Nilai BMA suatu polutan di udara ambien sangat dipengaruhi oleh jumlah emisinya, baik emisi dari wilayah setempat maupun emisi yang berasal dari wilayah lain. Untuk itu perlu ditentukan BME (baku mutu emisi). Penentuan BME hendaknya menjadi perhatian dengan berlakunya otonomi daerah. Era otonomi daerah di Indonesia ditandai dengan ditetapkannya UU no. 22/1999 tentang Pemerintah Daerah serta PP No. 25/2000 tentang Kewenangan Pemerintah Pusat dan Kewenangan Provinsi sebagai Daerah Otonom. Kedua peraturan tersebut mengubah struktur pembagian wewenang dalam bidang lingkungan hidup, termasuk didalamnya pengendalian pencemaran udara.

Setelah berlaku otonomi daerah, maka setiap pemerintah daerah (Pemda) di Indonesia, tidak terkecuali Pemprov DKI Jakarta, mengalami dilema. Di satu sisi Pemda dituntut untuk meningkatkan kesejahteraan penduduk, yang selama ini ditinjau dari peningkatan perekonomian. Pertumbuhan ekonomi tersebut dapat dicapai antara lain dengan membuka peluang industri sebesar-besarnya. Di sisi lain Pemda juga harus menjaga kualitas lingkungannya, yang kadangkala berbenturan dengan upaya peningkatan perekonomian. Untuk mengatasi dilema ini, khususnya dalam upaya menjaga kualitas lingkungan udara, Pemda dapat menetapkan BME yang dapat berfungsi secara efisien dalam meningkatkan perekonomian tanpa terlalu mengorbankan lingkungan.

Kewenangan yang dimiliki Pemda dalam mengendalikan pencemaran udara menyebabkan Pemda harus berhati-hati dalam menetapkan BME. Hal ini disebabkan BME terkait erat dengan kegiatan ekonomi. Jika BME ditetapkan terlalu rendah, maka kegiatan ekonomi menjadi terhambat. Sementara itu jika kebijakan BME tidak dilaksanakan dengan ketat, maka pencemaran udara akan meningkat, yang pada akhirnya juga akan mengganggu kegiatan ekonomi. Hal ini menyebabkan peran Pemda dalam menetapkan BME sangat besar, dan kebijakan BME harus diterapkan dengan bijaksana agar kegiatan ekonomi tidak terdistorsi, terutama dalam kaitannya dengan penggunaan BBF sebagai sumber energi.

Nilai optimum penggunaan BBF sebagai sumber energi yang dihasilkan dari pengembangan model optimasi pada penelitian ini sangat bergantung pada kebijakan yang menetapkan BME dari gas-gas penyebab pencemaran deposisi asam. Saat ini telah ada perangkat hukum yang mengatur BME gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>, baik yang berlaku di tingkat pusat (PP 41/1999) maupun tingkat provinsi (Kepgub DKI Jakarta 670/2000 dan 1041/2000), sayangnya belum ada dokumentasi mengenai proses pengembangan perangkat hukum tersebut. Hal ini menyebabkan informasi mengenai dasar keputusan menetapkan nilai BME tidak diketahui. Idealnya pengembangan perangkat hukum diawali dengan kajian akademis, yang dokumentasinya selalu menyertai perangkat hukum itu sendiri. Kemudahan dalam mengakses dasar pengembangan suatu kebijakan diharapkan akan meningkatkan pemahaman masyarakat akan pentingnya penerapan suatu kebijakan lingkungan.

Pemahaman masyarakat, terutama yang bergerak dalam bidang industri, diharapkan dapat mengarahkan kegiatan industri untuk tidak hanya bertujuan memperoleh keuntungan ekonomi sebesar-besarnya. BME yang ditetapkan oleh pemerintah pusat hanya mengatur industri-industri yang berpotensi besar mencemari udara, sedangkan industri-industri yang tidak berpotensi besar mencemari udara dikelompokkan ke dalam industri lain-lain dan harus memenuhi BME dengan jumlah parameter yang sama untuk semua industri. BME ditetapkan berdasarkan konsentrasi parameter, bukan beban emisi. Hal ini mengakibatkan beberapa industri terbebani melakukan pemantauan parameter yang tidak signifikan untuk industri terkait, yang pada akhirnya menyebabkan industri cenderung mengabaikan peraturan.

Kebijakan penetapan BME tidak hanya berlaku bagi kegiatan industri, tetapi juga perlu diterapkan pada pengguna mobil pribadi. Pada Perda DKI Jakarta No 2 tahun 2005 sebenarnya kendaraan bermotor telah diwajibkan menjalani uji emisi sekurang-kurangnya setiap 6 (enam) bulan. Hasil iju emisi tersebut dihubungkan dengan pembayaran pajak kendaraan. Untuk meningkatkan adanya transportasi publik, hendaknya uji emisi ini jangan dulu diterapkan pada kendaraan umum. Pajak kelebihan emisi dapat diterapkan pada kendaraan pribadi, agar pertumbuhan kendaraan pribadi tidak terlalu besar. Selain itu hasil dari pajak ini dapat digunakan untuk mensubsidi pengguna kendaraan non-mesin.

Penetapan BMA dan BME merupakan kebijakan lingkungan yang berbasis CAC. Fauzi (2004) menyatakan bahwa kebijakan lingkungan berbasis CAC tidak memprioritaskan efisiensi. CAC sulit mencapai tingkat pencemaran yang efisien, karena 2 hal, yaitu:

1. Pemerintah harus menggunakan sumberdaya yang ada, untuk memperoleh informasi yang tepat, guna mengetahui kondisi pencemaran yang terjadi.
2. Setiap industri harus mencapai standar pencemaran tertentu (BME), sedangkan biaya abatement untuk setiap industri berbeda.

Selain mempertimbangkan aspek ekonomi dan lingkungan, aspek sosial juga perlu dipertimbangkan dalam pengelolaan pencemaran udara, khususnya pencemaran deposisi asam.

### 6.3. Sosial

Sebagian besar masuknya kedua gas penyebab deposisi asam ke udara berasal dari berbagai kegiatan manusia untuk meningkatkan kesejahteraan. Kegiatan tersebut secara umum berupa transportasi, industri, dan aktivitas dalam rumah tangga. Karena itu pendekatan sosial untuk mengatasi pencemaran udara oleh gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  antara lain dapat dilakukan dengan pembenahan sistem ketiga kegiatan besar tersebut.

Buruknya kondisi sistem transportasi, terutama sistem transportasi publik, menyebabkan pertumbuhan kendaraan yang sangat pesat. Ketiadaan transportasi umum yang nyaman, aman, dan tepat waktu mendorong masyarakat untuk menggunakan kendaraan pribadi. Kondisi ini menyebabkan terjadinya peningkatan jumlah dan pemakaian kendaraan. Sesuai dengan hasil penelitian ini, peningkatan jumlah kendaraan yang disertai peningkatan penggunaan BBM akan menyebabkan peningkatan emisi gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  yang mencemari udara.

Untuk mengendalikan hal itu pemerintah perlu mendorong pengintegrasian pengembangan sistem transportasi, terutama pengembangan sistem transportasi publik. Selain itu sistem transportasi juga perlu dijadikan sebagai salah satu persyaratan dalam pembangunan kawasan perumahan. Penggunaan kendaraan secara bersama (*car pooling*)

merupakan salah satu alternatif dalam mengendalikan kemacetan. Pemerintah juga perlu mendorong industri untuk menyediakan angkutan bagi karyawannya, sehingga beban lalu lintas menjadi semakin berkurang, yang pada akhirnya akan mengurangi pencemaran udara.

Jika subsidi BBM menyebabkan pemborosan dalam penggunaan BBM sebagai sumber energi, maka subsidi bagi pejalan kaki atau pengguna sepeda diharapkan dapat mereduksi penggunaan kendaraan bermotor dan mengurangi penggunaan BBM. Pemberian subsidi bagi pengguna alat transportasi yang tidak menggunakan BBM dapat dijadikan alternatif bagi upaya mereduksi kemacetan dan pencemaran udara. Namun demikian kebijakan subsidi bagi pengguna alat transportasi non-mesin ini harus didahului dengan penyediaan infrastruktur, yang berupa jalur khusus bagi pejalan kaki dan pengguna sepeda.

Meskipun pemberian subsidi bagi pejalan kaki dan pengguna sepeda memerlukan sistem monitoring yang cukup sulit, tetapi alternatif kebijakan ini perlu dipertimbangkan penerapannya. Kebijakan subsidi ini selain bertujuan untuk mereduksi pencemaran udara dan mengurangi kemacetan, juga berguna dalam memberikan kompensasi bagi masyarakat ekonomi lemah yang menerima dampak polusi udara dari kegiatan emisi yang tidak mereka lakukan. Kegiatan emisi pada umumnya dilakukan oleh masyarakat yang tingkat ekonominya cukup mapan, berupa penggunaan kendaraan bermotor dan kegiatan industri.

Pada sektor industri, Undang Undang Nomor 5 tahun 1984 tentang Perindustrian dapat menjadi dasar untuk pengembangan dan implementasi kebijakan guna mencegah pencemaran udara yang bersumber dari kegiatan industri. Dalam UU tersebut secara jelas dinyatakan tentang larangan bagi kegiatan industri untuk mencemari dan menurunkan kualitas lingkungan. Setiap kegiatan industri wajib menyusun dokumen pengelolaan lingkungan hidup bagi kegiatan industrinya pada saat mengajukan permohonan izin usaha. Dokumen tersebut antara lain berisi informasi tentang emisi yang dikeluarkan oleh kegiatan industri. Salah satu cara untuk memenuhi nilai ambang batas emisi kegiatan industri dilakukan dengan mengukur emisi yang dikeluarkan oleh kegiatan industri.

Selama ini pengukuran emisi dirasakan terlalu mahal bagi sebagian besar industri. Disarankan pengukuran emisi tidak perlu dilakukan secara langsung, melainkan melalui

perhitungan dengan menggunakan rumus (2.5). Hasil pengukuran ataupun perhitungan tersebut dibandingkan dengan BME yang tertera pada Surat Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup no. 13 Tahun 1995, jika hasilnya melampaui nilai BME maka pihak industri harus melakukan upaya untuk mereduksinya.

Namun demikian, di Indonesia masih banyak jenis industri yang hingga saat ini belum memiliki standar BME. Dalam Surat Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup no. 13 Tahun 1995 hanya terdapat 4 jenis kegiatan atau industri yang diatur BME-nya, yaitu: industri besi baja, industri pulp dan kertas, pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batu bara, serta industri semen. Kegiatan industri lain yang sudah diatur BME-nya adalah kegiatan minyak dan gas yang diatur dalam Surat Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup no. 129 Tahun 2003 serta kegiatan industri pupuk yang diatur pada SK Menteri Lingkungan Hidup no. 133 Tahun 2004.

Selain dari kegiatan transportasi dan industri, ternyata aktivitas dalam rumah tangga juga merupakan sumber utama pencemaran udara (PE-UI, 2004 dan Pemprov DKI Jakarta, 2006). Aktivitas domestik tersebut dapat berupa penggunaan BBF dalam rumah tangga, serta pembakaran dan pembuangan sampah. Sebagian bahan bakar domestik yang selama ini digunakan adalah BBF jenis minyak tanah atau kerosen yang mengemisikan berbagai pencemar ke udara ambien. Minyak tanah telah berusaha digantikan dengan BBF jenis lain yang lebih ramah lingkungan, yaitu LPG (*Liquified Petroleum Gas*) oleh pemerintah. Namun usaha pemerintah ini banyak mengalami hambatan, antara lain karena masyarakat tidak memahami bahwa salah satu alasan kebijakan konversi minyak tanah ke LPG adalah untuk melindungi lingkungan. Jika lingkungan tercemar, maka masyarakat juga yang akan merugi, seperti hasil penelitian ini dari model simulasi sistem dinamik yang memprediksi akan adanya sejumlah penduduk DKI Jakarta mengalami sakit, bahkan meninggal akibat pencemaran udara.

Selama ini masyarakat hanya mengetahui bahwa alasan konversi minyak tanah ke LPG lebih didasarkan pada usaha pemerintah untuk mengurangi subsidi BBM. Jika masyarakat dapat dengan mudah mengakses kajian akademik yang menyertai kebijakan konversi minyak tanah, tentunya mereka akan lebih memiliki komitmen untuk mengikuti anjuran pemerintah. Untuk mengatasi hal itu diperlukan koordinasi antar lembaga, baik lembaga yang berwenang mengembangkan, melaksanakan, dan mensosialisasikan, serta

mengevaluasi berbagai kebijakan publik. Di bawah ini akan dijabarkan instrumen penunjang apa yang diperlukan agar pelaksanaan suatu kebijakan publik dapat berfungsi secara efektif.

#### **6.4. Penunjang Kebijakan**

Instrumen penunjang kebijakan pertama berupa lembaga sebagai pelaksana kebijakan. Di tingkat pusat, Kementerian Lingkungan Hidup, Departemen Energi dan Sumberdaya mineral, Departemen Perhubungan, Departemen Perindustrian, dan Departemen Kesehatan adalah beberapa kementerian yang secara langsung terkait dengan permasalahan pencemaran udara. Di samping kementerian tersebut masih ada beberapa instansi lain yang juga memiliki peranan tertentu dalam hal pengelolaan kualitas udara, misalnya Departemen Dalam negeri serta Kementerian Riset dan Teknologi.

Di tingkat provinsi DKI Jakarta ada berbagai institusi yang terlibat dalam upaya peningkatan kualitas udara, diantaranya adalah Badan Pengelola Lingkungan Hidup Daerah (BPLHD), Badan Meteorologi dan Geofisika (BMG), Balai Penelitian dan Pengembangan (Balitbang) Departemen Kesehatan, Pusat Penelitian dan Pengembangan (Puslitbang) Jalan Raya Pekerjaan Umum (PU), Dinas Perindustrian dan Perdagangan, Dinas Pertamanan, Dinas Perhubungan, Dinas Tata Kota, Dinas Kesehatan, Dinas Kebersihan, dan Dinas Pertambangan (Pemprov DKI Jakarta, 2006). Sementara itu, terdapat beberapa instansi pemerintah yang melakukan pemantauan kualitas udara, di antaranya adalah BPLHD, BMG, Balitbang Departemen Kesehatan, dan Puslitbang Jalan Raya PU. Pemantauan dilaksanakan sesuai dengan kebutuhan masing-masing instansi.

Beberapa instansi pemerintah juga telah melaksanakan berbagai usaha yang berhubungan dengan upaya peningkatan kualitas udara. Sayangnya usaha-usaha tersebut dilaksanakan tanpa berkoordinasi dengan instansi lainnya, hal ini terlihat dari adanya pemantauan kualitas udara oleh berbagai instansi yang kadangkala bersifat pengulangan. Kurangnya koordinasi juga terlihat dari belum adanya kerangka kerja bersama antar instansi.

Selain dari koordinasi antar lembaga, kuantitas dan kualitas sumberdaya manusia (SDM) juga menjadi faktor yang cukup penting dalam menangani polusi udara.

Kurangnya jumlah SDM yang bertanggung jawab terhadap kualitas udara di BPLHD misalnya, tentu akan mengganggu kinerja di lembaga lainnya. Karena BPLHD sebagai lembaga yang berhak mengesahkan emisi yang dikeluarkan oleh kegiatan industri, maka keterlambatan yang disebabkan oleh minimnya tenaga pelaksana di BPLHD akan menghambat perizinan serta berbagai kegiatan terkait lainnya. Satu hal penting yang juga dibutuhkan dalam pelaksanaan pengendalian pencemaran udara adalah kualitas dari aparat pelaksana. Banyak instansi pemerintah di tingkat pusat maupun daerah yang kekurangan petugas yang berkualitas untuk mengelola pencemaran udara.

Meskipun Pemprov DKI Jakarta telah memiliki perhatian terhadap masalah pencemaran udara, namun karena banyak permasalahan lain di ibukota yang dirasa lebih mendesak, maka upaya peningkatan kualitas udara perkotaan belum menjadi prioritas utama. Hal ini terlihat dari minimnya pendanaan yang dialokasikan bagi pengelolaan kualitas udara, pada tahun 2004 besarnya hanya 0,12% dari PDRB (Pemprov DKI Jakarta, 2006). Dalam pengembangan model alternatif kebijakan di penelitian ini, biaya penerapan kebijakan pada kondisi sekarang diberi bobot rendah, dan pada skenario pembangunan berbasis lingkungan biaya ini meningkat menjadi sedang, dan tinggi pada skenario pembangunan berbasis ekonomi. Agar pengelolaan kualitas udara DKI Jakarta lebih baik dari kondisi saat ini, Pemprov DKI Jakarta hendaknya meningkatkan alokasi pendanaan.

#### **6.5. Analisis Gabungan Antara Hasil Model Terhadap Kebijakan Yang Diusulkan**

Hasil pertama dari penelitian ini adalah besarnya jumlah optimum bahan bakar fosil (BBF) yang dapat digunakan sebagai sumber energi di provinsi DKI Jakarta, yaitu setara dengan BBF yang menghasilkan energi sebesar 50,691 Milyar kWh dengan nilai jual Rp. 25,090 Triliun. Jika dibandingkan dengan PDRB pada tahun 2004 yang besarnya Rp. 70,843 Triliun, maka penggunaan energi penduduk DKI Jakarta sangat boros. Nilai penggunaan energi sebesar 35,416 persen dari PDRB merupakan gambaran pemborosan penggunaan energi. Adanya pemborosan ini diperkuat dengan membandingkan indeks intensitas energi per kapita Indonesia terhadap negara lain.

Intensitas energi per kapita di Indonesia cukup tinggi dibandingkan dengan negara lain. Intensitas energi adalah perbandingan antara jumlah konsumsi energi per PDB (Pendapatan Domestik Bruto). Semakin efisien penggunaan energi suatu negara, maka nilai intensitasnya semakin kecil. Menurut KLH (2006) negara Jepang memiliki indeks intensitas energi per kapita sebesar 100, dan intensitas energi Indonesia mencapai indeks 505, padahal PDB Indonesia lebih rendah dibandingkan Jepang. Data ini menunjukkan penggunaan energi di Indonesia tidak efisien atau boros. Negara-negara maju dengan PDB yang tinggi memiliki intensitas energi berkisar pada indeks 100-285. Di sisi lain negara tetangga kita, yaitu Malaysia dan Thailand memiliki nilai intensitas energi sebesar 456 dan 377. Tingginya nilai intensitas energi Indonesia menyatakan bahwa peluang untuk mengurangi penggunaan energi masih sangat besar, dan hal ini akan dapat dicapai melalui program peningkatan efisiensi penggunaan energi.

Efisiensi penggunaan energi dapat dicapai melalui berbagai kebijakan, antara lain kebijakan peningkatan harga BBF yang telah memperhitungkan pentingnya konversi sumberdaya alam ireversibel (BBF) ke sumberdaya alam reversibel dan sudah memperhitungkan biaya abatemen untuk mereduksi gas-gas pencemar yang diemisikan dari pembakaran BBF. Namun demikian kebijakan kenaikan harga BBF tetap harus mempertimbangkan kemampuan usaha kecil dan bagi masyarakat tidak mampu tetap harus diberi bantuan dalam jangka waktu tertentu. Kebijakan mengurangi subsidi BBM juga dapat diterapkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi. Kebijakan ini diharapkan dapat menyeimbangkan harga energi yang berasal dari sumberdaya energi terbarukan agar dapat mencapai harga yang kompetitif dibanding dengan harga BBF. Kebijakan efisiensi penggunaan energi juga dapat dicapai melalui pemberian subsidi bagi pengguna alat transportasi yang tidak menggunakan BBM.

Kebijakan penghematan penggunaan energi nasional ditandai dengan keluarnya Inpres No.10 tahun 2005, yang antara lain berisi tentang pembatasan terhadap siaran televisi dan penurunan intensitas pendingin ruangan. Namun pelaksanaan penghematan energi yang didasarkan pada Inpres ini dirasa belum optimal, karena Inpres ini belum mencantumkan penalti dan lebih ditujukan kepada kegiatan instansi pemerintah. Seyogyanya kebijakan penghematan penggunaan energi tidak hanya ditujukan pada instansi pemerintah, namun perlu dilaksanakan pada seluruh aktivitas. Secara lebih luas

kebijakan efisiensi penggunaan energi dapat diberlakukan pada kegiatan transportasi, industri, dan rumah tangga.

Pada sektor transportasi perlu diberlakukan kebijakan penataan sistem transportasi, terutama pengadaan transportasi publik, serta penyediaan infrastruktur yang menunjang kemudahan pengguna alat transportasi non mesin. Di sektor industri perlu diterapkan kebijakan untuk menggunakan pola industri bersih dan efisien. Pola industri bersih dapat dilaksanakan dengan cara menggunakan peralatan dan mesin dengan tingkat efisiensi yang tinggi, memanfaatkan limbah industri (terutama bagi industri yang menghasilkan limbah biomassa) sebagai sumber energi, memanfaatkan panas buang, dan menerapkan prinsip daur ulang. Sedangkan efisiensi penggunaan energi di sektor rumah tangga dapat dicapai antara lain dengan pemakaian lampu dan pendingin ruangan yang hemat energi serta peralatan memasak yang efisiensinya tinggi.

Semua bentuk penghematan penggunaan energi akan berhasil baik jika didahului dengan penelitian dan pengembangan, sehingga peningkatan kualitas SDM memegang peran penting dalam upaya mereduksi keborosan penggunaan energi. Meskipun masyarakat Indonesia dikatakan boros dalam menggunakan energi, namun ternyata konsumsi energi per kapita Indonesia masih relatif rendah dibanding negara lain. KLH (2006) menyatakan perbandingan konsumsi energi per kapita antar negara dengan suatu indeks. Jika negara Jepang diberi indeks 100 untuk menyatakan konsumsi energi per kapitanya, maka nilai indeks untuk Indonesia adalah 11, sementara itu Thailand dan Malaysia memiliki indeks 24 dan 49.

Kondisi tersebut merupakan dilema bagi Indonesia dan khususnya provinsi DKI Jakarta, karena di satu pihak penggunaan energinya dinyatakan boros, sementara di pihak lain sebenarnya konsumsi energi per kapita masih rendah. Hal ini menimbulkan pertanyaan: **dapatkah** perekonomian disini tetap tumbuh sesuai dengan target dengan peningkatan konsumsi energi yang minimal?

Jawaban dari pertanyaan ini sebenarnya merupakan esensi dari pembangunan berkelanjutan, dimana pembangunan yang dilaksanakan untuk mendorong pertumbuhan ekonomi masih tetap dapat dilaksanakan tanpa merusak lingkungan, melalui penghematan sumberdaya alam, termasuk sumber energi. Apabila pembangunan seperti ini dapat diwujudkan, maka biaya pembangunan dari sisi penggunaan energi akan

semakin kecil sehingga pertumbuhan ekonomi yang dihasilkan menjadi semakin besar. Dengan kata lain tantangan pembangunan Indonesia dalam pemanfaatan energi adalah bagaimana meminimumkan elastisitas energi.

Elastisitas energi adalah perbandingan antara pertumbuhan konsumsi energi dengan pertumbuhan ekonomi. Semakin rendah nilai elastisitas energi maka semakin efisien penggunaan energi. Tahun 1985-2000 nilai elastisitas energi Indonesia berada pada kisaran 1,04–1,35, sedangkan nilai elastisitas energi negara-negara maju pada kurun waktu yang sama berada pada kisaran 0,55–0,65. Angka yang diberikan oleh PE-UI (2004) menyatakan bahwa elastisitas rata-rata untuk energi listrik di Indonesia adalah 1,5, yang memperlihatkan bahwa penggunaan listrik disini masih tidak produktif dan tidak efisien. Hal ini berarti kenaikan 1 persen pada pertumbuhan ekonomi membutuhkan 1,5 persen konsumsi listrik. Nilai elastisitas energi yang tinggi disebabkan karena penggunaan energi di Indonesia lebih banyak untuk konsumsi dibandingkan untuk produksi, sehingga pertumbuhan ekonomi relatif lebih rendah dibandingkan dengan peningkatan penggunaan energi.

Pertumbuhan ekonomi provinsi DKI Jakarta pada penelitian ini sebesar 3,6 persen sedangkan target pertumbuhan ekonomi pemerintah adalah 7 persen. Dengan pola konsumsi energi seperti saat ini tentunya pencapaian target pertumbuhan ekonomi dari pemerintah akan menyebabkan konsumsi energi sekitar 2 kali lipat. Kondisi tersebut akan menyebabkan pencemaran udara yang semakin besar, dan meningkatnya biaya abatement, biaya kerusakan lingkungan, serta ongkos pengobatan. Oleh karena itu efisiensi dalam penggunaan energi, terutama yang berasal dari BBF, harus dilaksanakan agar pertumbuhan penggunaan energi tidak terlalu tinggi, sementara itu peningkatan kesejahteraan masih dapat dilakukan hingga mencapai target pemerintah.

Sebagai contoh pertumbuhan penggunaan energi di negara maju berjalan lambat sekalipun pertumbuhan ekonomi tetap berlangsung (Surjadi, 2006). Hal ini disebabkan pertumbuhan penduduk di negara maju hampir nol persen, sedangkan pertumbuhan penduduk merupakan faktor utama yang menyebabkan naiknya permintaan energi. Dalam penelitian ini pertumbuhan ekonomi dalam kaitannya dengan penggunaan energi, terutama yang bersumber dari BBF, diprediksi akan merusak lingkungan, karena emisi pembakaran BBF antara lain akan menyebabkan deposisi asam. Sebenarnya pertumbuhan

ekonomi yang menghasilkan pemerataan dan mengurangi kemiskinan diprediksi tidak akan merusak lingkungan, karena konservasi terhadap sumberdaya alam dapat dilaksanakan. Penurunan tingkat kemiskinan atau peningkatan kesejahteraan diharapkan akan memperbaiki kondisi lingkungan, seperti prediksi Kuznet.

Meskipun hasil pengembangan model estimasi dengan metode simulasi sistem dinamik dalam penelitian ini menyatakan bahwa kondisi DKI Jakarta tidak sesuai dengan prediksi Kuznet dalam bentuk EKC, namun pertumbuhan ekonomi yang menghasilkan pemerataan dan mengurangi kemiskinan diyakini akan mereduksi kerusakan lingkungan. Pembangunan yang dilaksanakan di DKI Jakarta selama ini dirasakan belum merata dan belum berhasil mengurangi tingkat kemiskinan, sehingga pertumbuhan ekonomi yang dinyatakan dengan PDRB belum signifikan relasinya dengan upaya mereduksi degradasi lingkungan. Jika peningkatan kesejahteraan di DKI Jakarta sudah merata dalam arti dapat mereduksi kemiskinan, maka prediksi Kuznet dalam bentuk EKC tentunya dapat dipenuhi.

Kurva lingkungan Kuznet yang dihasilkan dalam penelitian ini berupa puncak-puncak yang tidak beraturan, dan menurut Fauzi (2007) hal yang mungkin mempengaruhi kondisi ini adalah adanya *hysteresis* yaitu keadaan dimana sistem sumberdaya alam mengalami keterkaitan dengan masa lalu (*path dependency*). Seperti diketahui bahwa kebijakan Indonesia terhadap pengelolaan sumberdaya alam yang berupa BBF di masa lalu kurang memperhatikan kaidah-kaidah keseimbangan dan konservasi lingkungan. Eksploitasi besar-besaran terhadap sumberdaya energi yang berupa BBF selama ini menyebabkan ketergantungan Indonesia terhadap BBF semakin besar. Sayangnya eksploitasi ini bukan menghasilkan pemerataan kesejahteraan serta pengurangan kemiskinan, tetapi malah menyebabkan Indonesia menjadi negara *net-importer* BBM.

Penggunaan BBF sebagai sumber energi secara tidak efisien bukan hanya berdampak buruk terhadap perekonomian tetapi juga terhadap lingkungan. Pembakaran BBF mengemisikan berbagai pencemar ke udara, dua diantaranya berupa gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$ , sebagai penyebab deposisi asam. Dampak negatif yang diakibatkan oleh kedua gas tersebut terjadi pada lingkungan biotik maupun lingkungan abiotik, namun demikian kerusakannya terhadap penurunan kondisi kesehatan manusia memiliki nilai ekonomi yang sangat besar.

Hasil kedua dari penelitian ini menyatakan bahwa pada tahun 2025 diprediksi biaya kesehatan yang harus dikeluarkan akibat adanya pencemaran gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> sebagai penyebab deposisi asam adalah Rp.985,29 Triliun. Sebagai perbandingan, studi yang dilaksanakan oleh Bank Dunia (Ostro, 1994) memperkirakan bahwa kerugian ekonomi akibat penurunan kesehatan yang disebabkan polusi udara di DKI Jakarta sebesar Rp.500 Milyar. Peningkatan nilai prediksi biaya kesehatan tersebut dari tahun ke tahun menggambarkan bahwa pencemaran udara merupakan hal yang bersifat kumulatif dan perlu untuk segera diatasi.

Salah satu bentuk tindakan guna mengatasi pencemaran udara adalah penerapan kebijakan guna mereduksi emisi gas-gas pencemar yang disebabkan oleh kegiatan antropogenik, kebijakan tersebut dapat berupa denda bagi pelaku kegiatan yang emisi pencemarannya melebihi BME (baku mutu emisi). Karena itu kebijakan denda ini harus diawali dengan penetapan BME. Kebijakan seperti ini merupakan contoh konkrit bahwa kebijakan lingkungan akan dapat diterapkan dengan baik jika basis kebijakannya merupakan gabungan dari CAC (*command and control*), dalam hal ini berupa penetapan BME, dan IE (instrumen ekonomi) yang berupa denda.

Selain kebijakan CAC yang berupa penetapan BME, perlu juga ditetapkan BMA (baku mutu ambien) guna melindungi kesehatan masyarakat. Kedua kebijakan berbasis CAC, yaitu penetapan BME dan BMA, harus dilaksanakan dengan tetap mengindahkan kepentingan kegiatan ekonomi, dalam arti penetapan BME dan BMA tidak boleh mendistorsi kegiatan ekonomi. Selama ini monitoring terhadap emisi sulit dilaksanakan karena pengukuran emisi membutuhkan biaya yang cukup besar, sehingga denda terhadap kelebihan emisi sulit diterapkan. Sebenarnya monitoring terhadap emisi tidak perlu dilakukan melalui pengukuran langsung. Prediksi terhadap kecepatan emisi dapat dilakukan melalui persamaan (2.5) dengan menghitung seluruh input produksi termasuk sistem pengendalian emisi yang digunakan lalu mengalikannya dengan faktor emisi, sehingga diperoleh prediksi kecepatan emisi. Jika prediksi tersebut melebihi BME, maka pelaku kegiatan dapat memilih menggunakan teknologi untuk mereduksi emisi atau membayar denda kelebihan emisi.

Di samping kebijakan CAC untuk melindungi kesehatan masyarakat akibat pencemaran udara yang terdapat pada Peraturan Pemerintah RI Nomor 41 tahun 1999,

telah diberlakukan pula Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia nomor 1407/Menkes/SK/XI/2002 tentang Pedoman Pengendalian Dampak Pencemaran Udara. Keputusan Menteri Kesehatan ini merupakan kebijakan yang mengatur koordinasi pengendalian dampak pencemaran udara, sehubungan dengan diberlakukannya otonomi daerah. Kebijakan yang dikeluarkan oleh Menteri Kesehatan ini merupakan jawaban bagi rendahnya koordinasi antar institusi dalam upaya pengendalian pencemaran udara di lintas sektoral maupun antara pusat dan daerah dalam proses perumusan maupun pelaksanaan kebijakan.

Dalam penelitian ini koordinasi antar institusi yang terkait dengan upaya pengendalian pencemaran udara dianalisis pada tahap ketiga pengembangan model, yaitu pengembangan model alternatif kebijakan menggunakan metode multi kriteria. Sebenarnya 10 tahun sebelum keputusan Menteri Kesehatan tersebut dikeluarkan, Kantor Menteri Lingkungan Hidup telah memulai pengembangan sebuah program nasional dalam upaya mengendalikan pencemaran udara. Program ini diberi nama Program Langit Biru (PLB). Dalam pelaksanaannya PLB diharapkan dapat menjadi payung bagi program dan aktivitas yang dilakukan oleh berbagai instansi, seperti Pemerintah Daerah, Departemen Perindustrian, dan Departemen Perhubungan, serta Departemen Kesehatan dengan tujuan mengontrol pencemaran udara (Resosudarmo, 1997 dan KLH, 2006).

Dalam kajiannya Resosudarmo (1997) memaparkan hal yang menarik, yaitu analisis mengenai upaya pengendalian pencemaran udara dalam kaitannya dengan pemerataan pendapatan. Jika selama ini terdapat kekhawatiran bahwa pengendalian pencemaran udara akan menurunkan pendapatan masyarakat, terutama masyarakat kota golongan rendah, maka Resosudarmo memaparkan kondisi sebaliknya. Perbaikan kualitas udara akan mengurangi jumlah penderita penyakit akibat pencemaran udara. Pengurangan jumlah penderita penyakit tersebut akan mengurangi jumlah biaya berobat yang harus dikeluarkan masyarakat, terutama sekali masyarakat kota golongan rendah. Selanjutnya pengeluaran yang semula digunakan untuk biaya berobat, akan dapat digunakan masyarakat untuk membeli berbagai kebutuhan hidup lain, terutama makanan. Kondisi ini menyebabkan terjadinya peningkatan permintaan dari berbagai sektor produksi, terutama produksi makanan. Peningkatan permintaan ini akan memacu sektor produksi makanan untuk memproduksi lebih banyak. Sektor produksi yang lebih aktif

pada akhirnya akan meningkatkan pendapatan masyarakat, terutama pendapatan dari kelompok masyarakat pertanian dan pedesaan sebagai produsen makanan akan meningkat.

Di sisi lain pengurangan jumlah penderita penyakit yang berhubungan dengan pencemaran udara akan mengurangi aktivitas di bidang kesehatan, yang berkaitan dengan pengobatan penderita penyakit akibat tingginya pencemaran udara. Pengurangan aktivitas di bidang kesehatan ini akan mengurangi pendapatan mereka yang berkecimpung di sektor kesehatan dan industri obat-obatan. Rata-rata pendapatan per kapita masyarakat kota, terutama yang berkecimpung di sektor kesehatan dan industri obat-obatan relatif lebih tinggi daripada masyarakat desa di sektor pertanian, maka pengendalian pencemaran udara akan mengakibatkan distribusi pendapatan semakin merata.

Jika pemerataan pendapatan akibat pengendalian pencemaran udara telah dianalisis oleh Resosudarmo (1997), maka analisis terhadap kemungkinan berkurangnya pendapatan akibat upaya pengendalian pencemaran udara telah dilakukan oleh beberapa pakar. Day dan Grifon (2001) membuktikan bahwa di Canada peningkatan faktor produktivitas total akan lebih besar dari biaya ekonomi untuk abatemen atau mitigasi dampak lingkungan akibat pencemaran udara. Menz dan Seip (2004) memaparkan hasil studi di Swedia yang membuktikan bahwa PDB riil akan meningkat dan pengangguran akan berkurang dengan diberlakukannya pajak emisi untuk mengontrol emisi  $SO_2$ ,  $NO_x$ , dan partikulat ( $PM_{10}$ ). Sepanjang pajak yang dihasilkan digunakan untuk berbagai upaya dalam mereduksi emisi polutan tersebut, misalnya dengan memperkenalkan mekanisme produksi bersih, penghematan penggunaan bahan bakar, dan sebagainya. Pajak jenis ini disebut *ear marked tax*.

## VII. KESIMPULAN DAN SARAN

### 7.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari ketiga model yang telah dikembangkan dan analisis kebijakan dalam disertasi ini maka ada beberapa hal yang dapat disimpulkan. Kesimpulan pertama adalah jumlah optimum bahan bakar fosil (BBF) yang dapat digunakan sebagai sumber energi di provinsi DKI Jakarta setara dengan BBF yang dapat menghasilkan energi sebesar 50,691 Milyar kWh dengan nilai jual Rp. 25,090 Triliun. Jika nilai jual energi ini dibandingkan dengan PDRB pada tahun 2004 yang besarnya Rp.70,843 Triliun, maka diperoleh nilai penggunaan energi sebesar 35,416 persen dari PDRB. Besarnya perbandingan antara jumlah konsumsi energi terhadap PDRB merupakan gambaran pemborosan penggunaan energi di DKI Jakarta. Efisiensi penggunaan energi dapat dicapai melalui berbagai kebijakan, antara lain kebijakan peningkatan harga BBF, mengurangi subsidi BBM, subsidi bagi pengguna alat transportasi yang tidak menggunakan BBM, serta penghematan penggunaan energi nasional pada kegiatan transportasi, industri, dan rumah tangga.

Kesimpulan kedua dari penelitian ini berupa prediksi biaya kesehatan yang harus dikeluarkan akibat adanya pencemaran gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> sebagai penyebab deposisi asam pada tahun 2025 adalah Rp.985,29 Triliun, atau lebih dari 5 kali lipat dibandingkan dengan prediksi nilai PDRB. Keadaan seperti prediksi pada tahun 2025 tentu tidak perlu terjadi, mengingat pada tahun 2004 diprediksi biaya abatement yang perlu dikeluarkan guna mereduksi gas-gas penyebab deposisi asam besarnya hanya 0,08 persen dari PDRB. Oleh karena itu kebijakan untuk mereduksi gas-gas tersebut harus segera diterapkan. Kebijakan tersebut dapat merupakan gabungan dari kebijakan berbasis CAC (*command and control*), dalam hal ini berupa penetapan BME dan BMA, serta kebijakan berbasis IE (instrumen ekonomi) berupa denda bagi kegiatan yang emisinya melebihi BME.

Kesimpulan ketiga dari penelitian ini menyatakan bahwa alternatif kebijakan yang dikembangkan guna meningkatkan kesejahteraan dalam kaitannya dengan pengendalian pencemaran deposisi asam hendaknya didasarkan pada kaidah-kaidah lingkungan. Karena kebijakan pembangunan yang berbasis ekonomi semata akan menyebabkan

kerusakan lingkungan yang pada akhirnya juga akan merugikan secara ekonomi. Kebijakan lingkungan akan dapat diterapkan dengan baik jika basis kebijakannya merupakan gabungan dari CAC (*command and control*) dan IE (instrumen ekonomi). Kebijakan pembangunan yang berbasis lingkungan hendaknya diterapkan secepatnya, karena hasil pengembangan model optimasi maupun simulasi menyatakan bahwa makin lama pencemaran udara tidak dikendalikan maka akan semakin besar biaya yang harus dikeluarkan.

Dari beberapa kesimpulan di atas, maka dapat diberikan berbagai saran yang akan dibahas pada sub-bab berikut.

## 7.2. Saran

Dalam upaya meningkatkan efisiensi dan efektivitas penggunaan energi disarankan untuk menerapkan beberapa kebijakan, seperti:

1. Meningkatkan harga BBF, kebijakan ini didasarkan atas pentingnya konversi sumberdaya alam ireversibel (BBF) ke sumberdaya alam reversibel serta sudah memperhitungkan biaya abatement untuk mereduksi gas-gas pencemar yang diemisikan dari pembakaran BBF. Peningkatan harga BBF juga dilaksanakan guna mengurangi subsidi BBM, kebijakan ini diharapkan dapat menyeimbangkan harga energi yang berasal dari sumberdaya energi reversibel agar dapat mencapai harga yang kompetitif dibanding dengan harga BBF. Namun demikian kebijakan kenaikan harga BBF tetap harus mempertimbangkan kemampuan usaha kecil dan memberikan bantuan dalam jangka waktu tertentu bagi masyarakat tidak mampu.
2. Menerapkan denda bagi pelaku kegiatan yang emisi pencemarannya melebihi BME (baku mutu emisi). Melalui kebijakan ini pelaku kegiatan yang melebihi BME dapat memilih menggunakan teknologi untuk mereduksi emisi atau membayar denda bagi kelebihan emisinya.
3. Memberikan subsidi bagi pengguna alat transportasi yang tidak menggunakan BBM, kebijakan subsidi ini selain berfungsi untuk mengurangi penggunaan kendaraan bermotor sehingga kemacetan dan pencemaran udara menurun,

juga diharapkan dapat mengurangi beban bagi masyarakat tidak mampu yang mendapat beban tambahan dari kenaikan harga BBM.

4. Melaksanakan penghematan penggunaan energi nasional pada kegiatan transportasi, industri, dan rumah tangga. Kebijakan ini harus terus menerus dikampanyekan, agar tidak berkesan kebijakan sesaat. Penghematan penggunaan energi juga dilaksanakan untuk mendorong penggunaan energi bagi kegiatan produktif, kebijakan ini dilakukan guna menurunkan nilai elastisitas energi Indonesia yang merupakan parameter efisiensi penggunaan energi.

Hasil yang diperoleh dari pajak BBF, yang pada penerapannya berupa kenaikan harga, dapat diberikan kembali kepada pelaku kegiatan yang mengemisikan pencemar ke udara guna mereduksi pencemarannya. Pajak jenis ini disebut *ear marked tax*, bagaimana operasionalisasi dari *ear marked tax* dapat dijadikan untuk penelitian lanjutan.

Selain pajak, bentuk instrumen ekonomi yang berupa denda juga disarankan diterapkan untuk mengatasi pencemaran udara, khususnya pencemaran deposisi asam. Denda harus dibayar oleh pelaku kegiatan yang mengemisikan pencemar di atas BME. Monitoring terhadap kegiatan yang mengemisikan pencemar dapat dilakukan melalui pengukuran langsung atau perhitungan prediksi kecepatan emisi yang didasarkan pada faktor emisi. Besarnya denda harus dihitung berdasarkan volume kelebihan emisi polutan dibandingkan BME dan lamanya waktu emisi yang berlebih. Bagi kendaraan bermotor hasil uji emisi dikaitkan dengan jumlah pajak kendaraan yang harus dibayar.

Subsidi merupakan instrumen ekonomi yang dapat diberikan bagi pengguna alat transportasi yang tidak menggunakan BBM. Selain untuk menurunkan pencemaran udara, subsidi jenis ini diharapkan dapat menurunkan kemacetan dan menjadi kompensasi terhadap pajak BBM yang juga berlaku bagi masyarakat ekonomi lemah. Masyarakat berpenghasilan rendah menerima dampak negatif polusi deposisi asam dari kegiatan emisi yang dilakukan oleh masyarakat berpenghasilan tinggi, dalam bentuk penggunaan kendaraan bermotor dan kegiatan industri. Penelitian lanjutan dapat dilakukan untuk menghitung seberapa besar pajak, denda, dan subsidi, maupun penghematan penggunaan energi yang dapat diterapkan dan bagaimana operasionalisasi kebijakan berbasis instrumen ekonomi tersebut. Apapun kebijakan yang akan diterapkan

oleh pemerintah, disarankan kajian akademik yang menyertai pengembangan kebijakan tersebut hendaknya dapat diakses oleh masyarakat guna meningkatkan kesadaran dan komitmen masyarakat dalam mematuhi kebijakan.

Dalam upaya untuk melindungi kesehatan masyarakat akibat pencemaran udara penerapan kebijakan berbasis instrumen ekonomi harus dilaksanakan berbarengan dengan kebijakan berbasis CAC yang berupa penetapan BMA dan BME. Analisis terhadap kebijakan lingkungan yang berbasis CAC mengusulkan bahwa perlu ditetapkan BMA dan BME yang berlaku spesifik untuk wilayah provinsi DKI Jakarta. Penetapan BMA perlu dilaksanakan guna menjaga kualitas udara agar manusia dan reseptor pencemaran udara lainnya tidak terkena dampak negatif dari pencemar.

Proses penetapan BMA pada umumnya dilaksanakan melalui fungsi *dose-response*, dengan mengevaluasi konsentrasi ambien pencemar terhadap dampaknya kepada reseptor. Penentuan konsentrasi pencemar dapat dilakukan dengan mengembangkan model optimasi dan estimasi seperti pada penelitian ini. Sedangkan penentuan dampaknya terhadap reseptor dapat dilakukan dengan menganalisis hasil-hasil penelitian terdahulu, seperti pada penelitian ini, maupun mengumpulkan data mengenai berbagai penyakit yang muncul di masyarakat dari puskesmas, rumah sakit, serta klinik kesehatan lainnya atau dari Dinas Kesehatan Provinsi DKI Jakarta.

Di samping BMA dari gas-gas penyebab deposisi asam, perlu juga ditetapkan BME, yang merupakan standar yang harus ditetapkan sebelum kebijakan denda terhadap kelebihan emisi dapat diberlakukan. Berdasarkan fakta masih banyak kegiatan industri yang belum ditentukan BME-nya, maka pemerintah perlu menetapkan berbagai kebijakan yang berkaitan dengan BME untuk kegiatan industri tersebut. Proses penetapan BME dapat dilakukan dengan membuat kurva yang menggambarkan MAC (*marginal abatement cost*) terhadap MD (*marginal damage*). Perhitungan MD dapat dilakukan dengan mengembangkan model estimasi melalui metode simulasi sistem dinamik seperti pada penelitian ini. Sedangkan perhitungan MAC dapat dilakukan melalui kajian besarnya biaya untuk mereduksi pencemar udara. Penentuan nilai BME dengan cara ini diharapkan akan tetap dapat meningkatkan perekonomian, tetapi lingkungan tetap terjaga.

Agar kebijakan mengenai pencemaran udara yang ditetapkan dapat berfungsi dengan efektif perlu instrumen penunjang berupa lembaga pelaksana. Lembaga-lembaga

tersebut harus memiliki koordinasi yang berupa kerangka kerja bersama, dan dapat mengembangkan kebijakan yang berbasis kaidah-kaidah akademik, serta mensosialisasikannya kepada publik.

Dampak negatif deposisi asam dapat berskala lokal, regional, maupun global. Namun dalam penelitian ini dampak yang dikaji barulah yang bersifat lokal, sedangkan dampak regional maupun global dapat diteliti pada penelitian lanjutan. Untuk penelitian lanjutan tersebut, tahap pertama dari langkah-langkah yang disarankan Spash dan McNally (2001) guna mengatasi degradasi lingkungan udara, yaitu membuat model dispersi harus dilakukan. Setelah pola dispersi dari gas  $\text{SO}_2$  dan  $\text{NO}_2$  yang diemisikan dari DKI Jakarta diketahui, barulah data mengenai kondisi sosial demografi dari daerah yang dianggap sebagai reseptor dikumpulkan. Langkah penelitian selanjutnya dapat mengikuti langkah-langkah yang telah dilakukan dalam penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Akhadi, M. 1999. Desulfurisasi Mencegah Hujan Asam.  
<http://www.elektroindonesia.com/elektro/ener28.html>. [27 Feb 2004].
- [Bapedal] Badan Pengendalian Dampak Lingkungan. 2000. Laporan Kualitas Udara di Indonesia. Badan Pengendalian Dampak Lingkungan. Jakarta.
- Barney, G.O., W. Qu, dan P. Bogdonoff. 1998. Sustainable Development for Italy, Part I: An Integrated Model-Based Report.  
<http://www.millenniuminstitute.net/publications/ItalyReport.pdf>. [02 Jan 2006].
- Barrow, C.J. 1991. Land Degradation: Development and Breakdown of Terrestrial Environments. Cambridge University Press. Cambridge.
- Bartz, S., dan D.L. Kelly. 2004. Economic Growth and the Environment: Theory and Facts. <http://www.hec.ca/cref/sem/documents/040325.pdf>. [21 Jun 2005].
- Baum, E. 2001. Unfinished Business: Why the Acid Rain Problem is Not Solved. A Clear The Air Report: Boston. <http://www.cleartheair.org/relatives/18480.pdf>. [28 Mar 2006].
- Belton, V., dan T.J. Stewart. 2002. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Kluwer Academic Publishers. Boston.
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2004. Statistik Lingkungan Hidup Indonesia 2000-2003. Badan Pusat Statistik. Jakarta.
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2005. Statistik Kesehatan 2004. Badan Pusat Statistik. Jakarta.
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2006. Beberapa Indikator Penting Sosial-Ekonomi Indonesia: Edisi Juli 2006. Badan Pusat Statistik. Jakarta.
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2006a. Informasi Umum dan Indikator Penting Indonesia: Leaflet Juli 2006. Badan Pusat Statistik. Jakarta.
- [BPS] Badan Pusat Statistik, [Bappenas] Badan Perencanaan Pembangunan Nasional, [UNFPA] *United Nations Populations Fund*. 2005. Proyeksi Penduduk Indonesia 2000-2025. BPS, Bappenas, dan UNFPA Indonesia. Jakarta.
- Burtraw, D., A. Krupnick, E. Mansur, D. Austin, dan D. Farrell. 1997. The Cost and Benefits of Reducing Acid Rain. Resources for the Future. Washington.

- Callan, S.J., dan J.M. Thomas. 2000. *Environmental Economics and Management: Theory, Policy, and Applications*, 2<sup>nd</sup> Ed. Harcourt College Publishers. Fort Worth.
- Colls, J. 2002. *Air Pollution*: 2<sup>nd</sup> Ed. Spon Press. London.
- Darmono. 2001. *Lingkungan Hidup dan Pencemaran: hubungannya dengan toksikologi senyawa logam*. UI-Press. Jakarta.
- Dawei, Z., T. Larssen, Z. Dongbao, G. Shidong, R.D. Vogt, H.M. Seip, dan O.J. Lund. 2001. Acid deposition and acidification of soil and water in the Tie Shan Ping Area, Chongqing, China. *Journal Water, Air, and Soil Pollution*. 130: 1733-1738.
- Day, K., dan R.Q. Grifon. 2001. *Economic Growth and Environmental Degradation in Canada*. [www.Irpp.org/miscpubs/archieve/repsp0501/day.pdf](http://www.Irpp.org/miscpubs/archieve/repsp0501/day.pdf). [13 Feb 2006].
- Dellink, R. 2004. *GAMS for environmental-economic Modelling*. Wageningen University. <http://www.sls.wau.nl/enr/gams/GAMSreader1.pdf>. [12 Apr 2006].
- Duchesne, L., R. Ouimet, dan D. Houle. 2002. Basal Area Growth of Sugar Maple in Relation to Acid Deposition, Stand Health, and Soil Nutrient. *Journal Environment Quality*. 31: 1676-1683.
- [EANET] East Asia Network for Acid Deposition. 2002. *EANET* (Monitoring Network in East Asia). [http://www.menlh.go.id/apec\\_vc/osaka/eastjava/acid\\_dep\\_en/eanet.html](http://www.menlh.go.id/apec_vc/osaka/eastjava/acid_dep_en/eanet.html). [29 Mar 2004].
- [EANET] East Asia Network for Acid Deposition. 2003. Report of the Session. The Third Session of the Scientific Advisory Committee on the Acid Deposition Monitoring Network in East Asia. Pattaya.
- [EANET] East Asia Network for Acid Deposition. 2003a. Report of the Inter-laboratory Comparison Project 2002 on Wet Deposition. Acid Deposition and Oxidant Research Center. Tokyo.
- Effendi, H. 2003. *Telah Kualitas Air: Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan*. Kanisius. Yogyakarta.
- Eriyatno. 2003. *Ilmu Sistem: Meningkatkan Mutu dan Efektivitas Manajemen*. IPB Press. Bogor.
- Elyza, R., dan D. Hulaiyah. 2005. *Kenapa Harus Menghemat Energi?*. [Http://www.Pelangi.Or.Id/News.Php?Hid=56](http://www.Pelangi.Or.Id/News.Php?Hid=56). [2 Mei 2008].
- Fardiaz, S. 1992. *Polusi Air & Udara*. Kanisius. Yogyakarta.

- Fauzi, A. 2004. *Ekonomi Sumber Daya Alam dan Lingkungan: Teori dan Aplikasi*. PT Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- Fauzi, A. 2004a. *Pelatihan Pemodelan Optimisasi, Data Envelopment Analysis dan Multi Criteria Analysis*. Institute of Resource and Environmental Economics Studies. Bogor.
- Fauzi, A. 2005. *Modelling With Multi Criteria Decision Making*. Materi kuliah Pascasarjana S3-PSL IPB. Bogor.
- Fauzi, A., dan S. Anna. 2005. *Pemodelan Sumber Daya Perikanan dan Kelautan: Untuk Analisis Kebijakan*. PT Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- Fauzi, A. 2007. *Economic of Natures Non-Convexity: Reorientasi Pembangunan Ekonomi Sumber Daya Alam dan Implikasinya Bagi Indonesia*. IPB. Bogor.
- Field, B.C., dan M.K. Field. 2002. *Environmental Economis: An Introduction*. 3<sup>rd</sup> Ed. McGraw-Hill. New York.
- Gustafsson, J., A. Salo, dan T. Gustafsson. 2001. *PRIME Decisions: An Interactive Tool for Value Tree Analysis*. <http://www.sal.hut.fi/Publications/pdf-files/pgus01.pdf>. [4 Jun 2007].
- Hamonangan. E, A. Kondo, A. Kaga, Y. Inoue, dan S. Soda. 2003. *Simulation and monitoring of sulfur dioxide and nitrogen oxide in the Jakarta metropolitan area*. <http://moon.env.eng.osaka-u.ac.jp/2003/jakarta.pdf>. [6 Sep 2005].
- Hoffert, M.I. 1972. *Atmospheric Transport, Dispersion, and Chemical Reactions in Air Pollution: A Review*. *AIAA Journal*. vol. 10. <http://pdf.aiaa.org/jaPreview/AIAAJ/1972/PVJAPRE50107.pdf>. [28 Feb 2007].
- Howells, G. 1995. *Acid Rain and Acid Waters* 2<sup>nd</sup> ed. Ellis Horwood Limited. New York.
- Hung, M.F., dan D. Shaw. 2005. *Economic Growth and the Environmental Kuznets Curve in Taiwan: A Simultaneity Model Analysis*. <http://www.sinica.edu.tw/econ/dshaw/download/ekc.pdf> . [21 Jun 2005].
- Husin, Y.A., H. Suharsono, dan M. Sobri. 1991. *Studi Tingkat Pencemaran Udara dan Hujan Asam di Daerah Bogor*. Pusat Penelitian Lingkungan Hidup-Lembaga Penelitian-IPB. Bogor.
- Kennedy, I.R. 1992. *Acid Soil and Acid Rain* 2<sup>nd</sup> ed. Research Studies Press Limited. Somerset.

- [KLH] Kementerian Lingkungan Hidup. 2004. Pengendalian Pencemaran Udara. KLH. Jakarta.
- [KLH] Kementerian Lingkungan Hidup. 2006. Status Lingkungan Hidup Indonesia 2006. KLH. Jakarta.
- Keputusan BAPEDAL Nomor: KEP-107/KABAPEDAL/11/1997. <http://lab-sst.fisika.ui.ac.id/ISPU/kepkadal107-11-1997%20pedoman%20teknis%20perhitungan.pdf>. [26 Nov 2004].
- Keputusan Gubernur DKI No 1041 tahun 2000 tentang Baku Mutu Udara Emisi Kendaraan Bermotor di Propinsi DKI Jakarta. [http://bplhd.jakarta.go.id/uupp/KEPGUB\\_NO\\_1041\\_TH\\_2000.pdf](http://bplhd.jakarta.go.id/uupp/KEPGUB_NO_1041_TH_2000.pdf). [7 Jun 2006].
- Keputusan Gubernur DKI No 670 tahun 2000 tentang Penetapan Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak di Propinsi DKI Jakarta. [http://bplhd.jakarta.go.id/uupp/KEPGUB\\_NO\\_670\\_TH\\_2000.pdf](http://bplhd.jakarta.go.id/uupp/KEPGUB_NO_670_TH_2000.pdf). [7 Jun 2006].
- Keputusan Gubernur DKI No 551 tahun 2001 tentang Penetapan Baku Mutu Udara Ambien dan Baku Tingkat Kebisingan di Propinsi DKI Jakarta. [http://bplhd.jakarta.go.id/uupp/KEPGUB\\_NO\\_551\\_TH\\_2001.pdf](http://bplhd.jakarta.go.id/uupp/KEPGUB_NO_551_TH_2001.pdf). [7 Jun 2006].
- Keputusan Gubernur DKI No 2515 tahun 2004 tentang Penetapan Upah Minimum Propinsi (UMP) Tahun 2005 di Propinsi Daerah Khusus Ibukota Jakarta. Jakarta: Pemda DKI Jakarta.
- Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia nomor 1407/Menkes/SK/XI/2002 tentang Pedoman Pengendalian Dampak Pencemaran Udara. <http://bankdata.depkes.go.id/data%20intranet/Regulasi/Kepmenkes/Kepmenkes%201407-MENKES-SK-XI-2002.pdf>. [2 Mei 2008].
- Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.: KEP.13/MENLH/3/1995 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak. <http://fwi.or.id/Regulasi/Aturan/0077.htm>. [28 Okt 2004].
- Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor: 141 Tahun 2003 tentang Ambang Batas Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor Tipe Baru dan Kendaraan Bermotor yang Sedang Diproduksi (*current production*). [http://bplhd.jakarta.go.id/uupp/km\\_141\\_03.pdf](http://bplhd.jakarta.go.id/uupp/km_141_03.pdf). [1 Mar 2006].
- Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 252 Tahun 2004 Tentang Program Penilaian Peringkat Hasil Uji Tipe Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor Tipe Baru. [http://www.menlh.go.id/i/art/pdf\\_1106816280.pdf](http://www.menlh.go.id/i/art/pdf_1106816280.pdf). [19 Des 2006].

- Keputusan Presiden Republik Indonesia No. 104 Tahun 2003 Tentang Harga Jual Tenaga Listrik Tahun 2004 Yang Disediakan Oleh Perusahaan Perseroan (persero) PT. Perusahaan Listrik Negara.
- Lal, R., W.H. Blum, C. Valentine, dan B.A. Stewart. 1998. *Methods for Assessment of Soil Degradation*. CRC Press Boca Raton. New York.
- Levin, J., dan J.A. Fox. 1996. *Elementary Statistics in Social Research* 7<sup>th</sup> ed. Addison-Wesley Educational Publishers Inc. New York.
- Lvovsky, K., G. Hughes, D. Maddison, B. Ostro, dan D. Pearce. 2000. *Environmental Costs of Fossil Fuels: A Rapid Assessment Method with Application to Six Cities*. Pollution Management Series: Paper No. 78.
- McTaggart, D., C. Findlay, dan M. Parkin. 1996. *Economics* 2<sup>nd</sup> Ed. Addison-Wesley Publishing Company. Sydney.
- Menz, F.C., dan H.M. Seip. 2004. *Acid rain in Europe and the United States: an update*. *Environmental Science & Policy*. vol. 7: 253-265.
- Misra, S.D., dan S.G. Tiwari. 1992. *Air and Atmospheric Pollutants*. Venus Publishing House. New Delhi.
- Muhammadi, E. Aminullah, dan B. Soesilo. 2001. *Analisis Sistem Dinamis: Lingkungan Hidup, Sosial, Ekonomi, Manajemen*. UMJ Press. Jakarta.
- Nakada, M., dan D. Pearce. 1998. *Acid rain in East Asia: Side-Payments and Cost Reduction in Abatement Technology*. CSERGE (*Centre for Social and Economic Research on the Global Environment*). London.  
[http://www.uea.ac.uk/env/cserge/pub/wp/gec/gec\\_1998\\_29.pdf](http://www.uea.ac.uk/env/cserge/pub/wp/gec/gec_1998_29.pdf). [18 Okt 2005].
- [NEPC] The National Environment Protection Council. 2006. *National Environment Protection (National Pollutant Inventory) Measure*.  
[http://www.ephc.gov.au/pdf/npi/npi\\_final\\_tap\\_report\\_06\\_06.pdf](http://www.ephc.gov.au/pdf/npi/npi_final_tap_report_06_06.pdf). [28 Feb 2007].
- Ohizumi, T., N. Take, N. Moriyama, O. Suzuki, dan M. Kusakabe. 2001. *Seasonal and spatial variation in the chemical and sulfur isotopic composition of acid deposition in Niigata, Japan*. *Journal Water, Air, and Soil Pollution*. 130: 1679-1684.
- Oka, T., M. Ishikawa, Y. Fujii, dan G. Huppel. 2005. *Calculating cost-effectiveness for activities with multiple environmental effects using the maximum abatement cost method*. *Journal of Industrial Ecology*. 9(4): 97-103.
- Olsthoorn, X., M. Amann, A. Bartonova, J. Clench-Aas, J. Cofala, K. Dorland, C. Guerreiro, J.F. Henriksen, H. Jansen, dan S. Larssen. 1999. *Cost benefit analysis*

of European air quality target for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and fine and suspended particulate matter in cities. *Environmental and Resource Economics*. 14: 333-351.

- Ostro, B. 1994. Estimating the Health Effects of Air Pollutants: A Method With an Application to Jakarta.  
[http://wdsbeta.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/IW3P/IB/1994/05/01/000009265\\_3970716141007/Rendered/PDF/multi0page.pdf](http://wdsbeta.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/IW3P/IB/1994/05/01/000009265_3970716141007/Rendered/PDF/multi0page.pdf). [18 Jan 2006].
- Pedercini, M. 2003. Working Papers in System Dynamics.  
<http://www.threshold21.com/BergenReview.pdf>. [28 Des 2005].
- Pemerintah Provinsi DKI Jakarta. 2006. Peningkatan Kualitas Udara Perkotaan Provinsi DKI Jakarta. Bappenas, Pemprov DKI Jakarta, ADB. Jakarta.
- [PE-UI]. Pengkajian Energi Universitas Indonesia. 2004. Indonesia Energy Outlook and Statistics 2004. PE-UI. Depok.
- Peraturan Daerah Propinsi Daerah Khusus Ibukota Jakarta Nomor 2 Tahun 2005 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara.  
<http://www.dikdasdk.go.id/photos/PERDA%20No.2%20Tahun%202005%20PENGENDALIAN%20PENCEMARAN%20UDARA.pdf>. [19 Des 2006].
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara.  
[http://www.indonesia.go.id/produk\\_uu/isi/produk\\_99/PP'99/PP41'99.html](http://www.indonesia.go.id/produk_uu/isi/produk_99/PP'99/PP41'99.html). [16 Mar 2004].
- Ratnaningsih, M. 2007. Valuasi Ekonomi Dampak Pencemaran Udara dan Implikasinya, Studi Kasus: di DKI Jakarta. *Jurnal Ekonomi Lingkungan*. Vol. 22: 53-65.
- Repenning, N. 1998. *Formulating Models of Simple Systems using Vensim PLE*. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge.
- Resosudarmo, B.P. 1997. Dampak Kebijakan Memperbaiki Kualitas Udara pada Pendapatan Masyarakat di Indonesia.  
[http://rspas.anu.edu.au/~u4039069/1996to2000/PRISMA4\\_99.pdf](http://rspas.anu.edu.au/~u4039069/1996to2000/PRISMA4_99.pdf). [2 Mei 2008].
- Robert, J. 2004. *Environmental Policy*. Routledge. London.
- Rosenthal, R.E. 2007. *GAMS: A User's Guide*.  
<http://www.gams.com/docs/gams/GAMSUsersGuide.pdf>. [5 Sep 2007].
- Salo, A.A, dan R.P. Hämäläinen. 2001. Preference Ratios in Multiattribute Evaluation (PRIME) — Elicitation and Decision Procedures Under Incomplete Information.

IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans. vol. 31, No. 6.

Sanim, B. 2005. Ekonomi Lingkungan dan Analisis Kebijakan (PSL 713). Materi kuliah Pascasarjana S3-PSL IPB. Bogor.

Sarwoko, M. 2005. Dasar-dasar Ekonometrika. Andi Offset. Yogyakarta.

Sawir, I. 1997. Acid Deposition: Measures for Limiting its Effects on Freshwater Ecosystem and its Case in Indonesia. Jurnal Studi Indonesia. vol. 7, No. 1.

Schnelle, K.B., dan P.R. Dey. 2000. Atmospheric Dispersion Modeling Compliance Guide. McGraw-Hill. New York.

Shah, J.J., T. Napal, dan C.J. Brandon. 1997. Urban Air Quality Management Strategy in Asia: Guidebook. The World Bank. Washington.

Shazam. 2004. Ordinary Least Squares Regression.  
<http://shazam.econ.ubc.ca/intro/ols2.htm>. [01 Feb 2005].

Soedomo, M. 2001. Pencemaran Udara (Kumpulan Karya Ilmiah). ITB. Bandung.

Soemarwoto, O. 2004. Atur Diri Sendiri: Paradigma Baru Pengelolaan Lingkungan Hidup. Gajah Mada University Press. Yogyakarta.

Spash, C.L., dan S. McNally. 2001. Managing Pollution: Economic Valuation and Environmental Toxicology. Edward Elgar Publishing, Inc. Massachusetts.

Stern, D.I. 2004. The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve. World Developmet. vol. 32, No. 8: 1419-1439.

Suparmoko, dan M.R. Suparmoko. 2000. Ekonomika Lingkungan: edisi pertama. BPFE. Yogyakarta.

Surjadi, A.J. 2006. Masalah Dampak Tingginya Harga Minyak Terhadap Perekonomian.  
[Http://Www.Csis.Or.Id/Working\\_Paper\\_File/74/Masalah\\_Dampak\\_Tingginya\\_Harga\\_Minyak\\_Terhadap\\_Perekonomia\\_.Pdf](Http://Www.Csis.Or.Id/Working_Paper_File/74/Masalah_Dampak_Tingginya_Harga_Minyak_Terhadap_Perekonomia_.Pdf). [12 Apr 2008].

Susandi, A. 2004. The Impact of International Greenhouse Gas Emissions Reduction on Indonesia. Reports on Earth System Science. Hamburg.

Susandi, A. 2004a. Future Emissions of air Pollutans in Indonesia: SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>.  
[http://www.ecomod.net/conferences/ecomod2004/ecomod2004\\_papers/235.pdf](http://www.ecomod.net/conferences/ecomod2004/ecomod2004_papers/235.pdf). [11 Jan 2006].

- Syahril, S., B.P. Resosudarmo, dan H.S. Tomo. 2002. Study on Air Quality in Jakarta, Indonesia: Future Trends, Health Impacts, Economic Value and Policy Options. ADB. Jakarta.
- Thompson, G.L., dan S. Thore. 1992. Computational Economics: Economic Modeling with Optimization Software. The Scientific Press. South San Francisco.
- Tietenberg, T. 1998. Environmental Economics and Policy, 2<sup>nd</sup> ed. Addison-Wesley Educational Publishers Inc. Massachusetts.
- Trick, M.A. 1996. Goal Programming. <http://mat.gsia.cmu.edu/mstc/multiple/node2.html>. [20 Jul 2005].
- Triantaphyllou, E., dan A. Sánchez. 1997. A Sensivity Analysis Approach for Some Deterministic Multi-Criteria Decision Making Methods. Decision Sciences. Vol. 28, No. 1: 151-194.
- Wolfgang, O. 2001. Eco-Correlation in Acidification Scenarios. <http://www.oekonomi.uio.no/memo/memopdf/memo2301.pdf>. [09 Mei 2006].
- World Bank Group. 1998. Pollution Prevention and Abatement Handbook. Environmental Fund. [http://www.ifc.org/ifcext/enviro.nsf/AttachmentsByTitle/p\\_ppah\\_finanEnviroFunds/\\$FILE/HandbookEnvironmentalFunds.pdf](http://www.ifc.org/ifcext/enviro.nsf/AttachmentsByTitle/p_ppah_finanEnviroFunds/$FILE/HandbookEnvironmentalFunds.pdf). [12 Des 2007].
- [US-EPA] US Environmental Protection Agency. 2002. EPA's Clean Air Markets - Acid Rain Program: Overview. <http://www.epa.gov/airmarkets/arp/overview.html>. [24 Feb 2004].
- [US-EPA] US Environmental Protection Agency. 2006. Introduction to Emission Factors. <http://www.epa.gov/oar/oaqps/efactors.html>. [3 Jul 2007].

Lampiran 1  
Tabel data penelitian

Tahun	Ambien SO <sub>2</sub>	Ambien NO <sub>2</sub>	Penduduk	PDRB	Kendaraan	Listrik	Hujan	Suhu	BBM	pH
1993	0.007	0.007	8.378	51.106	2.06349	12.11656	1.9544	27.85	7.819	5.63
1994	0.008	0.025	8.319	55.505	2.68475	13.57010	1.5749	27.75	5.845	5.28
1995	0.004	0.022	8.260	60.649	3.02114	15.31554	1.7848	27.86	6.828	5.35
1996	0.005	0.052	8.270	66.165	3.39775	17.02780	2.4480	27.88	7.154	5.71
1997	0.007	0.041	8.290	69.479	3.84276	19.23364	0.9245	28.03	19.391	4.64
1998	0.008	0.035	8.300	57.381	3.87656	17.87021	1.9136	28.17	10.248	4.42
1999	0.004	0.037	8.310	57.215	3.90950	18.77322	1.6299	27.56	10.219	4.96
2000	0.003	0.029	8.377	59.694	4.15944	20.76317	1.6566	27.85	6.284	4.76
2001	0.007	0.022	8.396	61.866	4.51982	22.39403	1.5985	27.87	6.931	5.86
2002	0.006	0.014	8.379	64.259	5.31881	24.02913	2.0614	28.34	13.093	5.22
2003	0.007	0.021	8.604	66.745	6.02171	25.48948	1.7513	28.40	18.281	5.39
2004	0.006	0.024	8.725	70.843	7.13261	26.25798	1.8309	28.52	19.538	4.43

Keterangan Tabel:

Ambien SO<sub>2</sub> : Konsentrasi rata-rata gas SO<sub>2</sub> di udara (ppm)

Ambien NO<sub>2</sub> : Konsentrasi rata-rata gas NO<sub>2</sub> di udara (ppm)

Penduduk : Jumlah penduduk (Juta Jiwa)

PDRB : Produk Domestik Regional Bruto DKI Jakarta (Triliun Rupiah)

Kendaraan : Jumlah kendaraan di DKI Jakarta, tidak termasuk TNI, Polri dan Corps Diplomatik (Juta Buah)

BBM : Penjualan BBM (Milyar Liter)

Listrik : Produksi listrik (Milyar kWh)

Hujan : Jumlah curah hujan (Ribuan mm)

Suhu : Temperatur rata-rata (°C)

pH : Derajat keasaman air hujan rata-rata

Lampiran 2  
Output dari General Algebraic Modeling System (GAMS)

```

GAMS Rev 138 MS Windows                                09/11/07 06:09:59 Page 1
General Algebraic Modeling System
Compilation

1  * Model Deposisi Asam: pembakaran BBM selain menghasilkan energi juga
   mengemisikan
2  * gas-gas penyebab deposisi asam SO2 dan NO2
3
4  SETS
5  I    goals / energi,SO2,NO2/;
6
7  PARAMETERS
8  MPENALTY(I)  penalti atau denda jika melebihi BME (Juta Rupiah)
9                /energi 0
10             SO2  0.00000825
11             NO2  0.00001723/
12  NPENALTY(I) penalti atau kerugian jika energi yg dihasilkan kurang dr target
13             /energi 495000
14             SO2  0
15             NO2  0/
16  B(I)        output per 1 MkWh energi mengemisikan polutan (ton)
17             /energi 1
18             SO2  1527963
19             NO2  1603091/
20  GOAL(I)     target energi yg ingin diperoleh dan emisi yg tdk melebihi BME
21             /energi 50.691451942
22             SO2  1058432
23             NO2  1323040/ ;
24
25  VARIABLES
26  COSTS      total biaya penalti
27
28  POSITIVE VARIABLES
29  X          energi yang dihasilkan
30  GPLUS(I)   kelebihan relatif thd goal
31  GMINUS(I)  defisit relatif thd goal;
32
33  EQUATIONS
34  OBJECTIVE  fungsi untuk menghitung total biaya penalti
35  DEFGOAL(I) definisi tiap-tiap goal I;
36
37  OBJECTIVE.. COSTS =E= SUM(I,MPENALTY(I)*GPLUS(I)+

```

## Lampiran 2 (lanjutan)

```

38          NPENALTY(I)*GMINUS(I);
39 DEFGOAL(I).. B(I)*X-GPLUS(I)+GMINUS(I) =E= GOAL(I);
40
41 MODEL DEPOSISIASAM /ALL/;
42 SOLVE DEPOSISIASAM USING LP MINIMIZING COSTS;

```

COMPILATION TIME = 0.010 SECONDS 3.2 Mb WIN213-138 Feb 03, 2004

GAMS Rev 138 MS Windows 09/11/07 06:09:59 Page 2  
 General Algebraic Modeling System  
 Equation Listing SOLVE DEPOSISIASAM Using LP From line 42

--- OBJECTIVE =E= fungsi untuk menghitung total biaya penalti

OBJECTIVE.. COSTS - 8.25E-6\*GPLUS(SO2) - 1.723E-5\*GPLUS(NO2)

- 495000\*GMINUS(energi) =E= 0 ; (LHS = 0)

--- DEFGOAL =E= definisi tiap-tiap goal I

DEFGOAL(energi).. X - GPLUS(energi) + GMINUS(energi) =E= 50.691451942 ;

(LHS = 0, INFES = 50.691451942 \*\*\*)

DEFGOAL(SO2).. 1527963\*X - GPLUS(SO2) + GMINUS(SO2) =E= 1058432 ;

(LHS = 0, INFES = 1058432 \*\*\*)

DEFGOAL(NO2).. 1603091\*X - GPLUS(NO2) + GMINUS(NO2) =E= 1323040 ;

(LHS = 0, INFES = 1323040 \*\*\*)

GAMS Rev 138 MS Windows 09/11/07 06:09:59 Page 3  
 General Algebraic Modeling System  
 Column Listing SOLVE DEPOSISIASAM Using LP From line 42

--- COSTS total biaya penalti

COSTS

(.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)

1 OBJECTIVE

## Lampiran 2 (lanjutan)

--- X energi yang dihasilkan

X

(.LO, .L, .UP = 0, 0, +INF)

1 DEFGOAL(energi)

1527963 DEFGOAL(SO2)

1603091 DEFGOAL(NO2)

--- GPLUS kelebihan relatif thd goal

GPLUS(energi)

(.LO, .L, .UP = 0, 0, +INF)

-1 DEFGOAL(energi)

GPLUS(SO2)

(.LO, .L, .UP = 0, 0, +INF)

-8.250000E-6 OBJECTIVE

-1 DEFGOAL(SO2)

GPLUS(NO2)

(.LO, .L, .UP = 0, 0, +INF)

-1.723000E-5 OBJECTIVE

-1 DEFGOAL(NO2)

--- GMINUS defisit relatif thd goal

GMINUS(energi)

(.LO, .L, .UP = 0, 0, +INF)

-495000 OBJECTIVE

1 DEFGOAL(energi)

GMINUS(SO2)

(.LO, .L, .UP = 0, 0, +INF)

1 DEFGOAL(SO2)

GMINUS(NO2)

(.LO, .L, .UP = 0, 0, +INF)

1 DEFGOAL(NO2)

## Lampiran 2 (lanjutan)

## MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	2	SINGLE EQUATIONS	4
BLOCKS OF VARIABLES	4	SINGLE VARIABLES	8
NON ZERO ELEMENTS	13		

GENERATION TIME = 0.020 SECONDS 3.9 Mb WIN213-138 Feb 03, 2004

EXECUTION TIME = 0.020 SECONDS 3.9 Mb WIN213-138 Feb 03, 2004

GAMS Rev 138 MS Windows 09/11/07 06:09:59 Page 5  
 General Algebraic Modeling System  
 Solution Report SOLVE DEPOSISIASAM Using LP From line 42

## SOLVE SUMMARY

MODEL DEPOSISIASAM	OBJECTIVE COSTS
TYPE LP	DIRECTION MINIMIZE
SOLVER CPLEX	FROM LINE 42

\*\*\*\* SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION  
 \*\*\*\* MODEL STATUS 1 OPTIMAL  
 \*\*\*\* OBJECTIVE VALUE 2007.6346

RESOURCE USAGE, LIMIT	0.040	1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	0	10000

GAMS/Cplex Jan 19, 2004 WIN.CP.NA 21.3 025.027.041.VIS For Cplex 9.0  
 Cplex 9.0.0, GAMS Link 25

Optimal solution found.  
 Objective : 2007.634595

LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
-------	-------	-------	----------

--- EQU OBJECTIVE	.	.	.	1.000
-------------------	---	---	---	-------

OBJECTIVE fungsi untuk menghitung total biaya penalti

--- EQU DEFGOAL definisi tiap-tiap goal I

## Lampiran 2 (lanjutan)

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
energi	50.691	50.691	50.691	40.227
SO2	1.0584E+6	1.0584E+6	1.0584E+6	-8.250E-6
NO2	1.3230E+6	1.3230E+6	1.3230E+6	-1.723E-5

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- VAR COSTS	-INF	2007.635	+INF	.
---- VAR X	.	50.691	+INF	.

COSTS total biaya penalti  
 X energi yang dihasilkan

---- VAR GPLUS kelebihan relatif thd goal

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
energi	.	.	+INF	40.227
SO2	.	7.6396E+7	+INF	.
NO2	.	7.9940E+7	+INF	.

---- VAR GMINUS defisit relatif thd goal

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
energi	.	.	+INF	4.9496E+5
SO2	.	.	+INF	8.2500E-6
NO2	.	.	+INF	1.7230E-5

\*\*\*\* REPORT SUMMARY : 0 NONOPT  
 0 INFEASIBLE  
 0 UNBOUNDED

EXECUTION TIME = 0.000 SECONDS 2.2 Mb WIN213-138 Feb 03, 2004

USER: GAMS Development Corporation, Washington, DC G871201:0000CA-ANY  
 Free Demo, 202-342-0180, sales@gams.com, www.gams.com DC9999

\*\*\*\* FILE SUMMARY

INPUT D:\My Documents\semester 7\gams disertasi\DEPOSISlasam-ver3.gms  
 OUTPUT C:\WINDOWS\gamsdir\DEPOSISlasam-ver3.lst

## Lampiran 3

Hasil pengolahan data pada model optimasi dengan berbagai skenario

Skenario	Produksi listrik (MkWh)	Biaya abatemen total (juta Rupiah)	Nilai jual listrik (juta rupiah)	Keuntungan (juta Rupiah)
BAU (kondisi awal)	50.691	2007.635	25090017.36	25088009.73
perubahan harga listrik	50.691	2007.635	32186757.36	32184749.73
perubahan harga abatemen	50.691	1640.465	25090524.27	25088883.81
perubahan BME	50.691	2014.377	25090017.36	25088002.98

## Lampiran 4

Proses identifikasi variabel yang mempengaruhi  
konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>

Hasil uji statistik terhadap 7 variabel yang dianggap mempengaruhi konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> di udara adalah:

Tabel 4.1. Hasil Analisis Regresi Terhadap Variabel Yang Mempengaruhi Konsentrasi Ambien Gas SO<sub>2</sub> di Udara

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	-0.1527	0.1593	-0.96	0.408	
Penduduk	0.00689	0.01481	0.46	0.674	9.1
PDRB	-0.0000002	0.0002576	-0.00	1.000	4.8
<b>Kendaraan</b>	<b>-0.001663</b>	<b>0.003593</b>	<b>-0.46</b>	<b>0.675</b>	<b>56.6</b>
BBM	0.0000277	0.0003062	0.09	0.934	5.7
<b>Listrik</b>	<b>0.0001416</b>	<b>0.0008076</b>	<b>0.18</b>	<b>0.872</b>	<b>28.9</b>
Hujan	-0.001224	0.002783	-0.44	0.690	2.1
Suhu	0.003815	0.006024	0.63	0.572	6.4

The regression equation is  
Ambien SO<sub>2</sub> = - 0.153 + 0.0069 Penduduk -0.0000002 PDRB - 0.001663 Kendaraan  
+0.000028 BBM +0.000142 Listrik - 0.00122 Hujan + 0.00381 Suhu

S = 0.002258    R-Sq = 40.3%    R-Sq(adj) = -99.0%

Durbin-Watson statistic = 2.94

Analisis kurva estimasi terhadap masing-masing variabel yang diduga berpengaruh terhadap konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> di udara dilakukan, dan hasilnya adalah:

## Lampiran 4 (Lanjutan)

Tabel 4.2. Hasil Estimasi Bentuk Fungsi Antara Konsentrasi Ambien Gas SO<sub>2</sub> (Dependen Variabel) Terhadap 7 Independen Variabel

Kurva Estimasi_1.									
Independent: <b>PENDUDUK</b>									
Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
AMBISO2	LIN	.056	9	.53	.486	-.0160	.0026		
AMBISO2	LOG	.056	9	.54	.482	-.0414	.0222		
AMBISO2	INV	.057	9	.54	.479	.0284	-.1894		
AMBISO2	QUA	.056	9	.53	.486	-.0160	.0026		
<b>AMBISO2</b>	<b>CUB</b>	<b>.105</b>	<b>8</b>	<b>.47</b>	<b>.641</b>	<b>-.9689</b>	<b>.1711</b>		<b>-.0008</b>
Kurva Estimasi_2.									
Independent: <b>PDRB</b>									
Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
AMBISO2	LIN	.001	9	.01	.916	.0052	9.5E-06		
AMBISO2	LOG	.000	9	1.4E-03	.971	.0050	.0002		
AMBISO2	INV	.000	9	1.3E-03	.972	.0056	.0115		
<b>AMBISO2</b>	<b>QUA</b>	<b>.212</b>	<b>8</b>	<b>1.08</b>	<b>.386</b>	<b>.0799</b>	<b>-.0024</b>	<b>2.0E-05</b>	
AMBISO2	CUB	.207	8	1.04	.396	.0549	-.0012		1.1E-07
Kurva Estimasi_3.									
Independent: <b>KENDARAAN</b>									
Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
AMBISO2	LIN	.000	9	3.3E-03	.956	.0057	2.0E-05		
AMBISO2	LOG	.003	9	.03	.864	.0062	-.0003		
AMBISO2	INV	.020	9	.18	.678	.0052	.0023		
AMBISO2	QUA	.115	8	.52	.613	.0101	-.0021	.0002	
<b>AMBISO2</b>	<b>CUB</b>	<b>.258</b>	<b>7</b>	<b>.81</b>	<b>.526</b>	<b>.0240</b>	<b>-.0129</b>	<b>.0028</b>	<b>-.0002</b>
Kurva Estimasi_4.									
Independent: <b>BBM</b>									
Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
AMBISO2	LIN	.086	9	.85	.382	.0049	8.4E-05		
AMBISO2	LOG	.069	9	.67	.435	.0038	.0009		
AMBISO2	INV	.049	9	.47	.511	.0067	-.0078		
<b>AMBISO2</b>	<b>QUA</b>	<b>.121</b>	<b>8</b>	<b>.55</b>	<b>.596</b>	<b>.0075</b>	<b>-.0004</b>	<b>1.9E-05</b>	
AMBISO2	CUB	.115	8	.52	.614	.0065	-.0002		4.7E-07

## Lampiran 4 (Lanjutan)

Kurva Estimasi\_5.

Independent: **LISTRİK**

Dependent	Mth	Rsqr	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
AMBISO2	LIN	.001	9	6.4E-03	.938	.0060	-9.E-06		
AMBISO2	LOG	.008	9	.07	.800	.0074	-.0005		
AMBISO2	INV	.022	9	.20	.667	.0049	.0162		
<b>AMBISO2</b>	<b>QUA</b>	<b>.275</b>	<b>8</b>	<b>1.52</b>	<b>.276</b>	<b>.0213</b>	<b>-.0017</b>	<b>4.3E-05</b>	
AMBISO2	CUB	.261	8	1.42	.298	.0162	-.0009		7.3E-07

Kurva Estimasi\_6.

Independent: **HUJAN**

Dependent	Mth	Rsqr	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
AMBISO2	LIN	.053	9	.51	.495	.0075	-.0010		
AMBISO2	LOG	.060	9	.58	.466	.0067	-.0016		
AMBISO2	INV	.065	9	.62	.451	.0044	.0024		
AMBISO2	QUA	.061	8	.26	.776	.0093	-.0031	.0006	
<b>AMBISO2</b>	<b>CUB</b>	<b>.086</b>	<b>7</b>	<b>.22</b>	<b>.880</b>	<b>.0239</b>	<b>-.0330</b>	<b>.0194</b>	<b>-.0037</b>

Kurva Estimasi\_7.

Independent: **SUHU**

Dependent	Mth	Rsqr	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
AMBISO2	LIN	.081	9	.79	.397	-.0367	.0015		
AMBISO2	LOG	.081	9	.80	.396	-.1366	.0428		
<b>AMBISO2</b>	<b>INV</b>	<b>.082</b>	<b>9</b>	<b>.80</b>	<b>.394</b>	<b>.0488</b>	<b>-1.2036</b>		
AMBISO2	QUA	.081	9	.79	.397	-.0367	.0015		
AMBISO2	CUB	.081	9	.79	.397	-.0367	.0015		

Variabel-variabel yang telah ditransformasi tersebut dijadikan sebagai variabel independen yang mempengaruhi variabel dependen (konsentrasi ambien gas SO<sub>2</sub> di udara), dan hasil analisis regresinya adalah:

## Lampiran 4 (Lanjutan)

Tabel 4.3. Hasil Analisis Regresi Terhadap Variabel Independen Hasil Transformasi Yang Mempengaruhi Konsentrasi Ambien Gas SO<sub>2</sub> di Udara

The regression equation is  
 Ambien SO<sub>2</sub> = 0.0081 + 2.88 penddk\_t + 0.36 pdrb\_t - 0.18 mobil\_t + 2.02 bbm\_t  
 + 1.16 listrik\_t - 0.37 hujan\_t - 0.47 suhu\_t

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	0.00808	0.02519	0.32	0.769	
penddk_t	2.875	3.190	0.90	0.434	5.7
pdrb_t	0.362	1.556	0.23	0.831	4.4
mobil_t	-0.183	1.340	-0.14	0.900	8.8
bbm_t	2.019	2.646	0.76	0.501	6.2
listrik_t	1.158	1.506	0.77	0.498	4.5
hujan_t	-0.374	2.261	-0.17	0.879	3.1
suhu_t	-0.465	2.535	-0.18	0.866	3.7

**S = 0.001906      R-Sq = 57.5%      R-Sq(adj) = -41.6%**

**Durbin-Watson statistic = 2.58**

Untuk menyempurnakan persamaan linier yang dihasilkan, maka dilakukan kembali analisis regresi dengan variabel kendaraan dan suhu tidak disertakan, hasilnya adalah:

Tabel 4.4. Hasil Analisis Regresi Terhadap 5 Variabel Independen Hasil Transformasi Yang Dianggap Mempengaruhi Konsentrasi Ambien Gas SO<sub>2</sub> di Udara

The regression equation is  
 Ambien SO<sub>2</sub> = 0.0046 + 2.57 penddk\_t + 0.32 pdrb\_t + 1.98 bbm\_t  
 + 0.969 listrik\_t - 0.43 hujan\_t

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	0.00462	0.01074	0.43	0.685	
penddk_t	2.574	1.834	1.40	0.219	3.1
pdrb_t	0.319	1.175	0.27	0.797	4.1
bbm_t	1.977	1.718	1.15	0.302	4.3
listrik_t	0.9690	0.7215	1.34	0.237	1.7
hujan_t	-0.429	1.643	-0.26	0.804	2.7

**S = 0.001484      R-Sq = 57.0%      R-Sq(adj) = 14.1%**

**Durbin-Watson statistic = 2.76**

Untuk menurunkan nilai statistik DW dilakukan uji Cochran-Orcutt, yang hasilnya dapat dilihat pada tabel berikut.

## Lampiran 4 (Lanjutan)

Tabel 4.5. Hasil Uji Cochran-Orcutt Terhadap 5 Variabel Independen Hasil Transformasi Yang Dianggap Mempengaruhi Konsentrasi Ambien Gas SO<sub>2</sub> di Udara (Variabel Dependen)

VARIABLE NAME	ESTIMATED COEFFICIENT	STANDARD ERROR	T-RATIO	PARTIAL P-VALUE	CORR.	STANDARDIZED COEFFICIENT
PENDDK_T	2.0710	1.622	1.277	0.258	0.496	0.5859
PDRB_T	0.16040	1.079	0.1487	0.888	0.066	0.0812
BBM_T	1.3461	1.590	0.8465	0.436	0.354	0.4784
LISTRİK_T	1.2540	0.4982	2.517	0.053	0.748	0.6663
HUJAN_T	0.83158	1.714	0.4851	0.648	0.212	0.2448
CONSTANT	-0.21753E-02	0.1039E-01	-0.2094	0.842	-0.093	0.0000

R-SQ = 0.6881      R-SQ(ADJ) = 0.3761  
 STANDARD ERROR OF THE ESTIMATE-SIGMA = 0.12647E-02

DURBIN-WATSON = 1.9841

Persamaan regresi yang dihasilkan dari uji Cochran-Orcutt di atas selanjutnya akan digunakan dalam pembuatan model simulasi dinamik.

Untuk mengetahui variabel-variabel yang mempengaruhi konsentrasi ambien gas NO<sub>2</sub> di udara juga dilakukan serangkaian uji statistik dengan urutan seperti di atas. Hasil uji statistik terhadap variabel-variabel yang dianggap mempengaruhi konsentrasi ambien gas NO<sub>2</sub> adalah:

Tabel 4.6. Hasil Analisis Regresi Terhadap Variabel Yang Mempengaruhi Konsentrasi Ambien Gas NO<sub>2</sub> di Udara

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	1.4810	0.4932	3.00	0.058	
Penduduk	0.01536	0.04586	0.33	0.760	9.1
PDRB	0.0027466	0.0007976	3.44	0.041	4.8
Kendaraan	-0.00121	0.01112	-0.11	0.920	56.6
BBM	0.0008356	0.0009482	0.88	0.443	5.7
Listrik	-0.000224	0.002501	-0.09	0.934	28.9
Hujan	0.012042	0.008618	1.40	0.257	2.1
Suhu	-0.06340	0.01865	-3.40	0.043	6.4

The regression equation is  
 Ambi\_NO2 = 1.48 + 0.0154 Penduduk + 0.00275 PDRB - 0.0012 Kendaraan  
 +0.000836 BBM - 0.00022 Listrik + 0.0120 Hujan - 0.0634 Suhu

s = 0.006993      R-Sq = 90.8%      R-Sq(adj) = 69.3%

Durbin-Watson statistic = 3.31

## Lampiran 4 (Lanjutan)

Hasil analisis ini menyatakan bahwa fungsi linier yang dihasilkan tidak dapat digunakan untuk menyatakan pengaruh variabel-variabel tersebut terhadap konsentrasi ambien gas NO<sub>2</sub> di udara. Untuk mengatasi hal ini dilakukan estimasi terhadap fungsi yang paling baik secara statistik antara masing-masing variabel independen terhadap variabel dependen.

Tabel 4.7. Hasil Estimasi Bentuk Fungsi Antara Konsentrasi Ambien Gas NO<sub>2</sub> (Dependen Variabel) Terhadap 7 Independen Variabel

Kurva Estimasi_1.									
Independent: <b>PENDUDUK</b>									
Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
AMBI_NOX LIN		.120	9	1.23	.296	.2796	-.0301		
AMBI_NOX LOG		.123	9	1.26	.290	.5765	-.2585		
AMBI_NOX INV		.126	9	1.29	.285	-.2374	2.2161		
AMBI_NOX QUA		.120	9	1.23	.296	.2796	-.0301		
<b>AMBI_NOX CUB</b>		<b>.378</b>	<b>8</b>	<b>2.43</b>	<b>.149</b>	<b>17.4031</b>	<b>-3.0578</b>		<b>.0140</b>
Kurva Estimasi_2.									
Independent: <b>PDRB</b>									
Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
AMBI_NOX LIN		.164	9	1.77	.217	-.0255	.0008		
AMBI_NOX LOG		.173	9	1.88	.204	-.1900	.0525		
AMBI_NOX INV		.181	9	1.99	.191	.0795	-3.2516		
<b>AMBI_NOX QUA</b>		<b>.208</b>	<b>8</b>	<b>1.05</b>	<b>.393</b>	<b>-.2947</b>	<b>.0097</b>	<b>-7.E-05</b>	
AMBI_NOX CUB		.208	8	1.05	.393	-.2947	.0097	-7.E-05	
Kurva Estimasi_3.									
Independent: <b>KENDARAAN</b>									
Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
AMBI_NOX LIN		.004	9	.04	.849	.0290	-.0005		
AMBI_NOX LOG		.002	9	.02	.893	.0245	.0016		
AMBI_NOX INV		.031	9	.29	.604	.0327	-.0224		
AMBI_NOX QUA		.197	8	.98	.416	-.0153	.0210	-.0023	
<b>AMBI_NOX CUB</b>		<b>.644</b>	<b>7</b>	<b>4.22</b>	<b>.053</b>	<b>-.2090</b>	<b>.1715</b>	<b>-.0381</b>	<b>.0026</b>
Kurva Estimasi_4.									
Independent: <b>BEM</b>									
Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
AMBI_NOX LIN		.001	9	9.5E-03	.924	.0259	7.4E-05		
AMBI_NOX LOG		.000	9	1.4E-03	.971	.0260	.0003		
AMBI_NOX INV		.000	9	8.5E-05	.993	.0266	.0008		
AMBI_NOX QUA		.040	8	.17	.849	.0473	-.0040	.0002	
<b>AMBI_NOX CUB</b>		<b>.057</b>	<b>8</b>	<b>.24</b>	<b>.790</b>	<b>.0346</b>		<b>-.0002</b>	<b>1.1E-05</b>

## Lampiran 4 (Lanjutan)

Kurva Estimasi\_5.

Independent: **LISTRIK**

Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
AMBI_NOX	LIN	.001	9	9.3E-03	.925	.0284	-9.E-05		
AMBI_NOX	LOG	.003	9	.02	.883	.0194	.0025		
AMBI_NOX	INV	.019	9	.17	.688	.0332	-.1192		
<b>AMBI_NOX</b>	<b>QUA</b>	<b>.479</b>	<b>8</b>	<b>3.67</b>	<b>.074</b>	<b>-.1308</b>	<b>.0173</b>	<b>-.0004</b>	
AMBI_NOX	CUB	.437	8	3.10	.101	-.0758	.0085		-7.E-06

Kurva Estimasi\_6.

Independent: **HUJAN**

Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
AMBI_NOX	LIN	.004	9	.04	.855	.0304	-.0021		
AMBI_NOX	LOG	.031	9	.29	.605	.0316	-.0092		
AMBI_NOX	INV	.069	9	.66	.436	.0151	.0192		
AMBI_NOX	QUA	.473	8	3.59	.077	.1335	-.1306	.0382	
<b>AMBI_NOX</b>	<b>CUB</b>	<b>.818</b>	<b>7</b>	<b>10.49</b>	<b>.006</b>	<b>-.2969</b>	<b>.7462</b>	<b>-.5127</b>	<b>.1086</b>

Kurva Estimasi\_7.

Independent: **SUHU**

Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
<b>AMBI_NOX</b>	<b>LIN</b>	<b>.082</b>	<b>9</b>	<b>.80</b>	<b>.393</b>	<b>.3644</b>	<b>-.0121</b>		
AMBI_NOX	LOG	.082	9	.81	.393	1.1555	-.3388		
AMBI_NOX	INV	.082	9	.81	.393	-.3132	9.5134		
AMBI_NOX	QUA	.082	9	.80	.393	.3644	-.0121		
AMBI_NOX	CUB	.082	9	.80	.393	.3644	-.0121		

Kemudian variabel-variabel tersebut ditransformasi dan dijadikan sebagai variabel independen yang dianggap mempengaruhi variabel dependen (konsentrasi ambien gas NO<sub>2</sub>), dan hasil analisis regresinya adalah:

## Lampiran 4 (Lanjutan)

Tabel 4.8. Hasil Analisis Regresi Terhadap Variabel Independen Hasil Transformasi Yang Dianggap Mempengaruhi Konsentrasi Ambien Gas NO<sub>2</sub> di Udara

The regression equation is

$$\text{Ambi\_NO}_2 = -0.025 - 0.00318 \text{ penddk\_n} - 0.36 \text{ pdrb\_n} + 0.643 \text{ mobil\_n} - 0.208 \text{ bbm\_n} + 0.088 \text{ listrik\_n} + 0.864 \text{ hujan\_n} - 0.94 \text{ suhu\_n}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	-0.0253	0.1409	-0.18	0.869	
penddk_n	-0.003178	0.005183	-0.61	0.583	4.3
pdrb_n	-0.365	1.472	-0.25	0.820	23.1
mobil_n	0.6426	0.6822	0.94	0.416	11.0
bbm_n	-0.2082	0.7535	-0.28	0.800	3.2
listrik_n	0.0879	0.4274	0.21	0.850	5.1
hujan_n	0.8642	0.3541	2.44	0.092	3.3
suhu_n	-0.943	2.995	-0.31	0.773	24.3

S = 0.006967      R-Sq = 90.9%      R-Sq(adj) = 69.5%

Durbin-Watson statistic = 1.92

Untuk itu perlu dilakukan analisis regresi berikutnya tanpa melibatkan variabel BBM dan suhu, serta mengembalikan variabel penduduk dari data awal, bukan hasil transformasi.

Tabel 4.9. Hasil Analisis Regresi Terhadap 5 Variabel Independen (1 Dari Data Awal dan 4 Hasil Transformasi) Yang Dianggap Mempengaruhi Konsentrasi Ambien Gas NO<sub>2</sub> di Udara

The regression equation is

$$\text{Ambi\_NO}_2 = -0.157 + 0.0177 \text{ Penduduk} + 0.022 \text{ pdrb\_n} + 0.451 \text{ mobil\_n} + 0.051 \text{ listrik\_n} + 0.792 \text{ hujan\_n}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	-0.1572	0.1583	-0.99	0.366	
Penduduk	0.01770	0.01907	0.93	0.396	2.5
pdrb_n	0.0218	0.4632	0.05	0.964	3.6
mobil_n	0.4513	0.3018	1.50	0.195	3.4
listrik_n	0.0507	0.2726	0.19	0.860	3.3
hujan_n	0.7921	0.2295	3.45	0.018	2.2

S = 0.005516      R-Sq = 90.4%      R-Sq(adj) = 80.9%

Durbin-Watson statistic = 2.08

Untuk lebih menyempurnakan nilai-nilai yang diperoleh perlu dilakukan uji Cochran-Orcutt, yang hasilnya dapat dilihat pada tabel berikut.

## Lampiran 4 (Lanjutan)

Tabel 4.10. Hasil Analisis Cochran-Orcutt Terhadap Variabel Independen (1 variabel dari data awal, 4 variabel hasil transformasi) Yang Dianggap Mempengaruhi Konsentrasi Ambien Gas NO<sub>2</sub> di Udara

R-SQ = 0.9049      R-SQ(ADJ) = 0.8099						
STANDARD ERROR OF THE ESTIMATE-SIGMA = 0.55019E-02						
VARIABLE NAME	ESTIMATED COEFFICIENT	STANDARD ERROR	T-RATIO 5 DF	P-VALUE	PARTIAL CORR.	STANDARDIZED COEFFICIENT
PENDUDUK	0.19162E-01	0.1904E-01	1.006	0.360	0.410	0.2207
PDRB_N	0.33731E-01	0.4473	0.7541E-01	0.943	0.034	0.0192
MOBIL_N	0.46410	0.3005	1.544	0.183	0.568	0.3943
LISTRİK_N	0.38314E-01	0.2557	0.1498	0.887	0.067	0.0353
HUJAN_N	0.81404	0.2391	3.405	0.019	0.836	0.7343
CONSTANT	-0.17019	0.1581	-1.076	0.331	-0.434	0.0000
DURBIN-WATSON = 2.0696						

Persamaan regresi yang dihasilkan dari uji Cochran-Orcutt selanjutnya digunakan dalam pembuatan model simulasi dinamik.

## Lampiran 5

Tabel data pertumbuhan penduduk, PDRB, kendaraan, BBM, dan produksi listrik di DKI Jakarta

Tahun	Penduduk	Pertumbuhan penduduk	PDRB	Pertumbuhan PDRB	Kendaraan	Pertumbuhan Kendaraan	BBM	Pertumbuhan BBM	Listrik	Pertumbuhan Listrik
1993	8.378		51.106		2.06349		7.819		12.11656	
1994	8.319	-0.007	55.505	0.086	2.68475	0.301	5.845	-0.253	13.57010	0.120
1995	8.260	-0.007	60.649	0.093	3.02114	0.125	6.828	0.168	15.31554	0.129
1996	8.270	0.001	66.165	0.091	3.39775	0.125	7.154	0.048	17.02780	0.112
1997	8.290	0.002	69.479	0.050	3.84276	0.131	19.391	1.711	19.23364	0.130
1999	8.310	0.002	57.215	-0.177	3.90950	0.017	10.219	-0.472	18.77322	-0.024
2000	8.377	0.008	59.694	0.043	4.15944	0.064	6.284	-0.003	20.76317	0.106
2001	8.396	0.002	61.866	0.036	4.51982	0.087	6.931	-0.385	22.39403	0.079
2002	8.379	-0.002	64.259	0.039	5.31881	0.177	13.093	0.103	24.02913	0.073
2003	8.604	0.027	66.745	0.039	6.02171	0.132	18.281	0.889	25.48948	0.061
2004	8.725	0.014	70.843	0.061	7.13261	0.184	19.538	0.396	26.25798	0.030
<b>Rata-rata</b>		<b>0.004</b>		<b>0.036</b>		<b>0.134</b>		<b>0.207</b>		<b>0.081</b>

Lampiran 6  
Algoritma Vensim untuk sub-model pencemaran gas SO<sub>2</sub>

- (01) Alfa SO<sub>2</sub>=  
-0.0021753  
Units: Dmnl
- (02) "B0-BBM"=  
0.0075  
Units: Dmnl
- (03) "B0-hujan"=  
0.0239  
Units: Dmnl
- (04) "B0-listrik"=  
0.0213  
Units: Dmnl
- (05) "B0-pdrb"=  
0.0799  
Units: Dmnl
- (06) "B0-penddk"=  
-0.9689  
Units: Dmnl
- (07) "B1-BBM"=  
-0.0004  
Units: Dmnl
- (08) "B1-hujan"=  
-0.033  
Units: Dmnl
- (09) "B1-listrik"=  
-0.0017  
Units: Dmnl
- (10) "B1-pdrb"=  
-0.0024  
Units: Dmnl
- (11) "B1-penddk"=  
0.1711  
Units: Dmnl

## Lampiran 6 (lanjutan)

- (12) "B2-BBM"=  
       1.9e-005  
 Units: Dmnl
- (13) "B2-hujan"=  
       0.0194  
 Units: Dmnl
- (14) "B2-listrik"=  
       4.3e-005  
 Units: Dmnl
- (15) "B2-pdrb"=  
       2e-005  
 Units: Dmnl
- (16) "B3-hujan"=  
       -0.0037  
 Units: Dmnl
- (17) "B3-penddk"=  
       -0.0008  
 Units: Dmnl
- (18) BBM= INTEG (  
       growth BBM,  
       BBM awal)  
 Units: Dmnl
- (19) BBM awal=  
       7.819  
 Units: Dmnl
- (20) "BBM-t"=  
       "B0-BBM"+"B1-BBM"\*BBM)+"B2-BBM"\*BBM\*BBM)  
 Units: Dmnl
- (21) "Beta-BBM"=  
       1.3461  
 Units: Dmnl

## Lampiran 6 (lanjutan)

- (22) "Beta-hujan"=  
0.83158  
Units: Dmnl
- (23) "Beta-listrik"=  
1.254  
Units: Dmnl
- (24) "Beta-pdrb"=  
0.1604  
Units: Dmnl
- (25) "Beta-penduduk"=  
+ 2.071  
Units: Dmnl
- (26) biaya CDA=  
Sakit CDA \* satuan biaya berobat  
Units: Rupiah/Year
- (27) Biaya Kesehatan=  
Biaya mortalitas + biaya LRI + biaya CDA  
Units: Rupiah/Year
- (28) "Biaya kesehatan & lingkungan"=  
(Biaya Kesehatan + biaya lingkungan) / konversi Rp  
Units: Milyar Rupiah/Year
- (29) biaya lingkungan=  
laju degradasi SO<sub>2</sub> \* 0.11 \* Biaya Kesehatan  
Units: Rupiah/Year
- (30) biaya LRI=  
Sakit LRI\* satuan biaya berobat  
Units: Rupiah/Year
- (31) Biaya mortalitas=  
mortalitas prematur \* VOSL  
Units: Rupiah/Year
- (32) BMA SO<sub>2</sub>=  
0.02  
Units: ppm

## Lampiran 6 (lanjutan)

- (33)  $cc = 20$   
Units: juta orang
- (34)  $"D-PVNetben" = \text{manfaat bersih} * \text{EXP}(-\text{int})$   
Units: Milyar Rupiah/Year
- (35)  $\text{Decay SO}_2 = ((\text{secondary sulfat} * (\text{Konsentrasi Ambien SO}_2)^{0.57}) * 100/86) + (0.05 * \text{Konsentrasi Ambien SO}_2)$   
Units: Dmnl
- (36)  $\text{DSO}_2 = \text{Konsentrasi Ambien SO}_2 + (\text{Alfa SO}_2 + ("Beta-penduduk" * \text{"penduduk-t"}) + ("Beta-pdrb" * \text{"PDRB-t"}) + ("Beta-BBM" * \text{"BBM-t"}) + ("Beta-listrik" * \text{"Listrik-t"}) + ("Beta-hujan" * \text{"Hujan-t"}))$   
Units: Dmnl
- (37)  $\text{FINAL TIME} = 2025$   
Units: Year  
The final time for the simulation.
- (38)  $\text{growth BBM} = \text{BBM} * \text{laju BBM}$   
Units: Dmnl/Year
- (39)  $\text{growth listrik} = \text{Listrik} * \text{laju listrik}$   
Units: Dmnl/Year
- (40)  $\text{growth PDRB} = \text{PDRB} * \text{laju pdrb}$   
Units: Dmnl/Year
- (41)  $\text{growth penduduk} = \text{Penduduk} * \text{GRR} * (1 - (\text{Penduduk}/\text{cc}))$   
Units: Dmnl/Year
- (42)  $\text{GRR} = 0.004$   
Units: Dmnl/Year

## Lampiran 6 (lanjutan)

- (43) harga satuan listrik=  
 $495 * 10^9$   
 Units: Rupiah/Year
- (44) Hujan=  
 $1.954$   
 Units: Dmnl
- (45) "Hujan-t"=  
 $"B0-hujan"+"B1-hujan"*Hujan)+("B2-hujan"*Hujan*Hujan)+$   
 $("B3-hujan"*Hujan*Hujan*Hujan)$   
 Units: Dmnl
- (46) INITIAL TIME = 1993  
 Units: Year  
 The initial time for the simulation.
- (47) int=  
 $0.05$   
 Units: Dmnl
- (48) Konsentrasi Ambien SO2 = INTEG (DSO2-Ddecay SO2,Konst awal SO2)  
 Units: Dmnl
- (49) Konsentrasi SO2 Kedua= INTEG (  
 $Konsentrasi\ Ambien\ SO2 * ((0.5)^{waktu\ paruh\ SO2}),0)$   
 Units: ppm
- (50) Konst awal SO2=  
 $0.007$   
 Units: Dmnl
- (51) konversi Rp=  
 $10^9$   
 Units: Rupiah/Milyar Rupiah
- (52) laju BBM=  
 $0.207$   
 Units: Dmnl/Year
- (53) laju degradasi SO2=  
 $1 / (1 + EXP( -Konsentrasi\ SO2\ Kedua/BMA\ SO2 ) )$   
 Units: Dmnl

## Lampiran 6 (lanjutan)

- (54) laju listrik=  
0.081  
Units: Dmnl/Year
- (55) laju mortalitas=  
0.0035  
Units: Dmnl/Year
- (56) laju pdrb=  
0.036  
Units: Dmnl/Year
- (57) Listrik= INTEG (growth listrik,listrik awal)  
Units: Dmnl
- (58) listrik awal=  
12.1166  
Units: Dmnl
- (59) "Listrik-t"=  
"B0-listrik"+"B1-listrik"\*Listrik)+"B2-listrik"\*Listrik\*Listrik)  
Units: Dmnl
- (60) manfaat bersih=  
nilai produksi listrik - "Biaya kesehatan & lingkungan"  
Units: Milyar Rupiah/Year
- (61) mortalitas prematur=  
IF THEN ELSE(Konsentrasi SO2 Kedua < BMA SO2, 0 ,  
0.002\*((Konsentrasi SO2 Kedua-BMA SO2)/BMA SO2) \*  
penduduk terpapar \* laju mortalitas)  
Units: orang/Year
- (62) nilai produksi listrik=  
(Listrik \* harga satuan listrik) / konversi Rp  
Units: Milyar Rupiah/Year
- (63) PDRB= INTEG (  
growth PDRB,  
pdrb awal)  
Units: Dmnl

## Lampiran 6 (lanjutan)

- (64) pdrb awal=  
51.106  
Units: Dmnl
- (65) "PDRB-t"=  
"B0-pdrb"+"B1-pdrb"\*PDRB)+"B2-pdrb"\*PDRB\*PDRB)  
Units: Dmnl
- (66) Penduduk= INTEG (growth penduduk,penduduk awal)  
Units: Dmnl
- (67) penduduk awal=  
8.378  
Units: Dmnl
- (68) penduduk terpapar=  
Penduduk \* proporsi penduduk terpapar \* 10<sup>6</sup>  
Units: orang
- (69) "penduduk-t"=  
"B0-penddk" + ("B1-penddk"\*Penduduk) +  
("B3-penddk"\*Penduduk\*Penduduk\*Penduduk)  
Units: Dmnl
- (70) prop dewasa=  
0.731  
Units: Dmnl
- (71) proporsi anak2=  
0.269  
Units: Dmnl
- (72) proporsi penduduk terpapar=  
0.126  
Units: orang
- (73) PVNetBen= INTEG ("D-PVNetben" + PVNetBen,"D-PVNetben")  
Units: Milyar Rupiah
- (74) Sakit CDA=  
IF THEN ELSE(Konsentrasi SO2 Kedua < BMA SO2, 0 , 5e-005 \*  
((Konsentrasi SO2 Kedua - BMA SO2)/BMA SO2) \* penduduk terpapar \*  
prop dewasa)  
Units: orang

## Lampiran 6 (lanjutan)

- (75) Sakit LRI=  
 IF THEN ELSE(Konsentrasi SO2 Kedua < BMA SO2, 0 , 0.0001 \*  
 ((Konsentrasi SO2 Kedua - BMA SO2)/BMA SO2) \* penduduk terpapar \*  
 proporsi anak2)  
 Units: orang
- (76) satuan biaya berobat=  
 620000  
 Units: Rupiah/orang/Year
- (77) SAVEPER =  
 TIME STEP  
 Units: Year [0,?]  
 The frequency with which output is stored.
- (78) secondary sulfat=  
 0.073/2612.24  
 Units: Dmnl
- (79) TIME STEP = 1  
 Units: Year [0,?]  
 The time step for the simulation.
- (80) VOSL=  
 1.35144\*10<sup>9</sup>  
 Units: Rupiah/(orang)
- (81) waktu paruh SO2=  
 365/26  
 Units: Dmnl

Lampiran 7  
Algoritma Vensim untuk sub-model pencemaran gas NO<sub>2</sub>

- (01) Alfa NO<sub>x</sub>=  
    -0.17019  
Units: Dmnl/Year
  
- (02) "B0-hujan"=  
    -0.2969  
Units: Dmnl
  
- (03) "B0-listrik"=  
    -0.1308  
Units: Dmnl
  
- (04) "B0-mobil"=  
    -0.209  
Units: Dmnl
  
- (05) "B0-pdrb"=  
    -0.2947  
Units: Dmnl
  
- (06) "B1-hujan"=  
    0.7462  
Units: Dmnl
  
- (07) "B1-listrik"=  
    0.0173  
Units: Dmnl
  
- (08) "B1-mobil"=  
    0.1715  
Units: Dmnl
  
- (09) "B1-pdrb"=  
    0.0097  
Units: Dmnl
  
- (10) "B2-hujan"=  
    -0.5127  
Units: Dmnl
  
- (11) "B2-listrik"=  
    -0.0004  
Units: Dmnl

## Lampiran 7 (lanjutan)

- (12) "B2-mobil"=  
-0.0381  
Units: Dmnl
- (13) "B2-pdrb"=  
-7e-005  
Units: Dmnl
- (14) "B3-hujan"=  
0.1086  
Units: Dmnl
- (15) "B3-mobil"=  
0.0026  
Units: Dmnl
- (16) "Beta-hujan"=  
0.81404  
Units: Dmnl/Year
- (17) "Beta-listrik"=  
0.038314  
Units: Dmnl/Year
- (18) "Beta-mobil"=  
0.4641  
Units: Dmnl/Year
- (19) "Beta-pdrb"=  
0.033731  
Units: Dmnl/Year
- (20) "Beta-penduduk"=  
0.019162  
Units: Dmnl/Year
- (21) biaya kesehatan=  
sakit \* satuan biaya berobat / konversi Rp  
Units: Milyar Rupiah/Year
- (22) biaya lingkungan=  
laju degradasi \* 0.11 \* biaya kesehatan  
Units: Milyar Rupiah/Year

## Lampiran 7 (lanjutan)

- (23) BMA NO<sub>2</sub>=  
0.03  
Units: ppm
- (24) cc=  
20  
Units: juta orang
- (25) "d-pvnb"=  
Manfaat bersih\*EXP(-int)  
Units: Milyar Rupiah/Year
- (26) Decay NO<sub>2</sub>=  
((secondary nitrat\*(Konsentrasi Ambien NO<sub>2</sub>)<sup>0.63</sup> \* 100/89) +  
(0.11\*Konsentrasi Ambien NO<sub>2</sub>))  
Units: Dmnl/Year
- (27) DNO<sub>2</sub>=  
(Alfa NO<sub>x</sub>+("Beta-penduduk"\*Penduduk)+("Beta-pdrb" \*  
"PDRB-n")+("Beta-mobil"\*"Mobil-n")+("Beta-listrik"  
\*"Listrik-n")+("Beta-hujan"\*"Hujan-n"))  
Units: Dmnl/Year
- (28) FINAL TIME = 2025  
Units: Year  
The final time for the simulation.
- (29) growth kendaraan=  
Mobil\*laju kendaraan  
Units: Dmnl/Year
- (30) growth listrik=  
Listrik\*laju listrik  
Units: Dmnl/Year
- (31) growth PDRB=  
PDRB\*laju pdrb  
Units: Dmnl/Year
- (32) growth penduduk=  
Penduduk\*pertumbuhan penddk \* (1- (Penduduk/cc))  
Units: Dmnl/Year

## Lampiran 7 (lanjutan)

- (33) harga satuan listrik=  
 $495 * 10^9$   
 Units: Rupiah/Year
- (34) Hujan=  
 $1.954$   
 Units: Dmnl
- (35) "Hujan-n"=  
 $"B0-hujan"+"B1-hujan"*Hujan)+("B2-hujan"*Hujan*Hujan)+$   
 $("B3-hujan"*Hujan*Hujan*Hujan)$   
 Units: Dmnl
- (36) INITIAL TIME = 1993  
 Units: Year  
 The initial time for the simulation.
- (37) int=  
 $0.05$   
 Units: Dmnl
- (38) kendaraan awal=  
 $2.06349$   
 Units: Dmnl
- (39) Konsentrasi Ambien NO2= INTEG (DNO2-Decay NO2,  
 Konst awal NO2)  
 Units: Dmnl
- (40) Konsentrasi Ambien NO2 Kedua=  
 $Konsentrasi\ Ambien\ NO2 * ((0.5)^{Waktu\ Paruh})$   
 Units: ppm
- (41) Konst awal NO2=  
 $0.007$   
 Units: Dmnl
- (42) konversi Rp=  
 $10^9$   
 Units: Rupiah/Milyar Rupiah
- (43) laju degradasi=  
 $1 / (1 + EXP (- Konsentrasi\ Ambien\ NO2\ Kedua / BMA\ NO2))$   
 Units: Dmnl

## Lampiran 7 (lanjutan)

- (44) laju kendaraan=  
0.134  
Units: Dmnl/Year
- (45) laju listrik=  
0.081  
Units: Dmnl/Year
- (46) laju pdrb=  
0.036  
Units: Dmnl/Year
- (47) Listrik= INTEG (growth listrik, listrik awal)  
Units: Dmnl
- (48) listrik awal=  
12.1166  
Units: Dmnl
- (49) "Listrik-n"=  
"B0-listrik"+"(B1-listrik"\*Listrik)+"(B2-listrik"\*Listrik\*Listrik)  
Units: Dmnl
- (50) Manfaat bersih=  
Nilai Produksi listrik - biaya kesehatan - biaya lingkungan  
Units: Milyar Rupiah/Year
- (51) Mobil= INTEG (growth kendaraan, kendaraan awal)  
Units: Dmnl
- (52) "Mobil-n"=  
"B0-mobil"+"(B1-mobil"\*Mobil)+"(B2-mobil"\*Mobil\*Mobil)+  
("B3-mobil"\*Mobil\*Mobil\*Mobil)  
Units: Dmnl
- (53) Nilai Produksi listrik=  
Listrik \* harga satuan listrik / konversi Rp  
Units: Milyar Rupiah/Year
- (54) PDRB= INTEG (growth PDRB, pdrb awal)  
Units: Dmnl

## Lampiran 7 (lanjutan)

- (55) pdrb awal=  
51.106  
Units: Dmnl
- (56) "PDRB-n"=  
"B0-pdrb"+"B1-pdrb"\*PDRB)+"B2-pdrb"\*PDRB\*PDRB)  
Units: Dmnl
- (57) Penduduk= INTEG (growth penduduk, penduduk awal)  
Units: Dmnl
- (58) penduduk awal=  
8.378  
Units: Dmnl
- (59) Penduduk Terpapar=  
Penduduk\*proporsi penduduk terpapar \* 10<sup>6</sup>  
Units: orang
- (60) pertumbuhan penddk=  
0.004  
Units: Dmnl/Year
- (61) proporsi dewasa=  
0.731  
Units: Dmnl
- (62) proporsi penduduk terpapar=  
0.126  
Units: orang
- (63) PVNetben= INTEG ("d-pvnb"+PVNetben, "d-pvnb")  
Units: Milyar Rupiah
- (64) sakit=  
IF THEN ELSE(Konsentrasi Ambien NO2 Kedua < BMA NO2, 0, 6.02 \*  
((Konsentrasi Ambien NO2 Kedua - BMA NO2) / BMA NO2) \* proporsi  
dewasa \* Penduduk Terpapar / 1877.55)  
Units: orang
- (65) satuan biaya berobat=  
620000  
Units: Rupiah/orang/Year

## Lampiran 7 (lanjutan)

- (66) SAVEPER =  
TIME STEP  
Units: Year [0,?]  
The frequency with which output is stored.
- (67) secondary nitrat=  
0.377/1877.55  
Units: Dmnl
- (68) TIME STEP = 1  
Units: Year [0,?]  
The time step for the simulation.
- (69) Waktu Paruh=  
365/50  
Units: Dmnl

Lampiran 8  
Data hasil simulasi sistem dinamik untuk sub-model pencemar gas SO<sub>2</sub>

Tahun	Penduduk	BBM	PDRB	Listrik	Konsentrasi SO <sub>2</sub> Kedua	Laju degradasi SO <sub>2</sub>	Penduduk terpapar	Mortalitas prematur	Biaya mortalitas
1993	8.378000	7.819000	51.105999	12.116600	0.000000	0.500000	1055628	0	0
1994	8.397474	9.437532	52.945816	13.098044	0.000000	0.500005	1058082	0	0
1995	8.416961	11.391102	54.851864	14.158986	0.000002	0.500022	1060537	0	0
1996	8.436460	13.749060	56.826530	15.305864	0.000005	0.500059	1062994	0	0
1997	8.455971	16.595116	58.872284	16.545639	0.000011	0.500137	1065452	0	0
1998	8.475494	20.030304	60.991688	17.885836	0.000023	0.500293	1067912	0	0
1999	8.495029	24.176577	63.187389	19.334589	0.000048	0.500602	1070374	0	0
2000	8.514577	29.181128	65.462135	20.900690	0.000097	0.501211	1072837	0	0
2001	8.534136	35.221622	67.818771	22.593645	0.000192	0.502406	1075301	0	0
2002	8.553706	42.512497	70.260246	24.423731	0.000380	0.504745	1077767	0	0
2003	8.573288	51.312584	72.789612	26.402054	0.000746	0.509322	1080234	0	0
2004	8.592881	61.934288	75.410034	28.540621	0.001462	0.518265	1082703	0	0
2005	8.612485	74.754684	78.124794	30.852411	0.002861	0.535701	1085173	0	0
2006	8.632100	90.228905	80.937286	33.351456	0.005594	0.569469	1087645	0	0
2007	8.651726	108.906288	83.851028	36.052925	0.010930	0.633319	1090118	0	0
2008	8.671362	131.449890	86.869667	38.973213	0.021345	0.744075	1092592	1	695176896
2009	8.691009	158.660019	89.996979	42.130043	0.041671	0.889295	1095067	8	11225073664
2010	8.710666	191.502640	93.236870	45.542576	0.081331	0.983152	1097544	24	31839404032
2011	8.730333	231.143692	96.593399	49.231525	0.158702	0.999642	1100022	53	72168693760
2012	8.750010	278.990448	100.070763	53.219280	0.309628	1.000000	1102501	112	1.51037E+11
2013	8.769698	336.741455	103.673309	57.530041	0.604011	1	1104982	226	3.0524E+11
2014	8.789395	406.446930	107.405548	62.189972	1.178170	1	1107464	449	6.0669E+11
2015	8.809102	490.581451	111.272148	67.227356	2.297947	1	1109947	885	1.19594E+12
2016	8.828818	592.131836	115.277946	72.672775	4.481756	1	1112431	1737	2.34771E+12
2017	8.848544	714.703125	119.427956	78.559273	8.740541	1	1114917	3403	4.59887E+12
2018	8.868279	862.646667	123.727364	84.922577	17.045696	1	1117403	6659	8.9987E+12

## Lampiran 8 (lanjutan)

Tahun	Penduduk	BBM	PDRB	Listrik	Konsentrasi SO <sub>2</sub> Kedua	Laju degradasi SO <sub>2</sub>	Penduduk terpapar	Mortalitas prematur	Biaya mortalitas
2020	8.907775	1256.745850	132.796082	99.237213	64.824463	1	1122380	25457	3.44041E+13
2021	8.927536	1516.892212	137.576736	107.275429	126.412842	1	1124870	49761	6.72496E+13
2022	8.947306	1830.888916	142.529495	115.964737	246.512573	1	1127361	97260	1.31441E+14
2023	8.967084	2209.882813	147.660553	125.357880	480.710510	1	1129853	190088	2.56893E+14
2024	8.986871	2667.328613	152.976334	135.511871	937.401489	1	1132346	371504	5.02065E+14
2025	9.006665	3219.465576	158.483475	146.488327	1827.956299	1	1134840	726045	9.81207E+14

## Lampiran 8 (lanjutan)

Tahun	Sakit LRI	Biaya LRI	Sakit CDA	Biaya CDA	Biaya Kesehatan	Biaya lingkungan	Biaya kesehatan & lingkungan	Nilai produksi listrik	Manfaat bersih	PVNetben
1993	0	0	0	0	0	0	0	5997.716797	5997.716797	5705.205078
1994	0	0	0	0	0	0	0	6483.532227	6483.532227	17115.61523
1995	0	0	0	0	0	0	0	7008.698242	7008.698242	40398.55469
1996	0	0	0	0	0	0	0	7576.402344	7576.402344	87463.98438
1997	0	0	0	0	0	0	0	8190.091309	8190.091309	182134.875
1998	0	0	0	0	0	0	0	8853.489258	8853.489258	372060.4063
1999	0	0	0	0	0	0	0	9570.622070	9570.622070	752542.5
2000	0	0	0	0	0	0	0	10345.840820	10345.840820	1514188.875
2001	0	0	0	0	0	0	0	11183.854492	11183.854492	3038219
2002	0	0	0	0	0	0	0	12089.747070	12089.747070	6087076.5
2003	0	0	0	0	0	0	0	13069.015625	13069.015625	12185653
2004	0	0	0	0	0	0	0	14127.607422	14127.607422	24383738
2005	0	0	0	0	0	0	0	15271.943359	15271.943359	48780912
2006	0	0	0	0	0	0	0	16508.970703	16508.970703	97576352
2007	0	0	0	0	0	0	0	17846.197266	17846.197266	195168416
2008	2	1225587.75	3	1665250.25	698067776	57135632	0.755203	19291.740234	19290.984375	390353792
2009	32	19789660	43	26888924	11271752704	1102630528	12.374384	20854.371094	20841.996094	780725888
2010	91	56132456	123	76269192	31971805184	3457646336	35.429451	22543.574219	22508.144531	1561471616
2011	205	127232464	279	172875344	72468799488	7968714752	80.437508	24369.605469	24289.167969	3122964480
2012	429	266276944	584	361800096	1.51665E+11	16683197440	168.348679	26343.542969	26175.193359	6245952000
2013	868	538133312	1179	731181184	3.06509E+11	33715974144	340.224823	28477.369141	28137.144531	12491929600
2014	1725	1069586368	2344	1453285632	6.09213E+11	67013402624	676.226135	30784.035156	30107.808594	24983885824
2015	3401	2108432768	4621	2864803584	1.20092E+12	1.32101E+11	1333.017456	33277.539063	31944.521484	49967800320
2016	6676	4138976256	9071	5623776768	2.35747E+12	2.59322E+11	2616.791260	35973.023438	33356.230469	99935633408
2017	13077	8107739648	17768	11016276992	4.61799E+12	5.07979E+11	5125.967773	38886.839844	33760.871094	1.99871E+11
2018	25588	15864585216	34767	21555783680	9.03612E+12	9.93973E+11	10030.089844	42036.671875	32006.582031	3.99743E+11
2019	50040	31024797696	67991	42154512384	1.7671E+13	1.94381E+12	19614.853516	45441.648438	25826.794922	7.99485E+11

## Lampiran 8 (lanjutan)

Tahun	Sakit LRI	Biaya LRI	Sakit CDA	Biaya CDA	Biaya Kesehatan	Biaya lingkungan	Biaya kesehatan & lingkungan	Nilai produksi listrik	Manfaat bersih	PVNetben
2020	97829	60653891584	132924	82412634112	3.45471E+13	3.80018E+12	38347.300781	49122.421875	10775.121094	1.59897E+12
2021	191226	1.1856E+11	259826	1.61092E+11	6.75292E+13	7.42821E+12	74957.437500	53101.335938	-21856.101563	3.19794E+12
2022	373757	2.31729E+11	507837	3.14859E+11	1.31988E+14	1.45187E+13	146506.453125	57402.542969	-89103.906250	6.39588E+12
2023	730482	4.52899E+11	992533	6.1537E+11	2.57961E+14	2.83757E+13	286336.968750	62052.148438	-224284.812500	1.27918E+13
2024	1427637	8.85135E+11	1939781	1.20266E+12	5.04153E+14	5.54568E+13	559610.000000	67078.375000	-492531.625000	2.55835E+13
2025	2790088	1.72985E+12	3790993	2.35042E+12	9.85287E+14	1.08382E+14	1093668.500000	72511.726563	-1021156.750000	5.11671E+13

Lampiran 9  
Data hasil simulasi sistem dinamik untuk sub-model pencemar gas NO<sub>2</sub>

Tahun	Penduduk	Mobil	PDRB	Listrik	Konsentrasi ambien NO <sub>2</sub> kedua	Laju degradasi	Penduduk terpapar	Sakit
1993	8.378000	2.063490	51.105999	12.116600	0.000044	0.500370	1055628	0
1994	8.397474	2.339998	52.945816	13.098044	0.000075	0.500623	1058082	0
1995	8.416961	2.653557	54.851864	14.158986	0.000141	0.501172	1060537	0
1996	8.436460	3.009134	56.826530	15.305864	0.000232	0.501931	1062994	0
1997	8.455971	3.412358	58.872284	16.545639	0.000337	0.502806	1065452	0
1998	8.475494	3.869614	60.991688	17.885836	0.000443	0.503694	1067912	0
1999	8.495029	4.388143	63.187389	19.334589	0.000539	0.504492	1070374	0
2000	8.514577	4.976154	65.462135	20.900690	0.000613	0.505105	1072837	0
2001	8.534136	5.642959	67.818771	22.593645	0.000657	0.505474	1075301	0
2002	8.553706	6.399115	70.260246	24.423731	0.000674	0.505612	1077767	0
2003	8.573288	7.256597	72.789612	26.402054	0.000681	0.505673	1080234	0
2004	8.592881	8.228981	75.410034	28.540621	0.000727	0.506055	1082703	0
2005	8.612485	9.331664	78.124794	30.852411	0.000909	0.507578	1085173	0
2006	8.632100	10.582108	80.937286	33.351456	0.001410	0.511746	1087645	0
2007	8.651726	12.000110	83.851028	36.052925	0.002540	0.521158	1090118	0
2008	8.671362	13.608125	86.869667	38.973213	0.004822	0.540098	1092592	0
2009	8.691009	15.431614	89.996979	42.130043	0.009100	0.575257	1095067	0
2010	8.710666	17.499451	93.236870	45.542576	0.016718	0.635816	1097544	0
2011	8.730333	19.844378	96.593399	49.231525	0.029781	0.729618	1100022	0
2012	8.750010	22.503525	100.070763	53.219280	0.051550	0.847914	1102501	1856
2013	8.769698	25.518997	103.673309	57.530041	0.087030	0.947895	1104982	4923
2014	8.789395	28.938543	107.405548	62.189972	0.143839	0.991794	1107464	9850
2015	8.809102	32.816307	111.272148	67.227356	0.233507	0.999584	1109947	17647
2016	8.828818	37.213692	115.277946	72.672775	0.373391	0.999996	1112431	29844
2017	8.848544	42.200325	119.427956	78.559273	0.589508	1	1114917	48736
2018	8.868279	47.855167	123.727364	84.922577	0.920706	1	1117403	77758

## Lampiran 9 (lanjutan)

Tahun	Penduduk	Mobil	PDRB	Listrik	Konsentrasi ambien NO2 kedua	Laju degradasi	Penduduk terpapar	Sakit
2019	8.888022	54.267761	128.181549	91.801308	1.424818	1	1119891	122038
2020	8.907775	61.539642	132.796082	99.237213	2.187702	1	1122380	189205
2021	8.927536	69.785957	137.576736	107.275429	3.336535	1	1124870	290587
2022	8.947306	79.137276	142.529495	115.964737	5.059311	1	1127361	442968
2023	8.967084	89.741669	147.660553	125.357880	7.633463	1	1129853	671173
2024	8.986871	101.767052	152.976334	135.511871	11.467790	1	1132346	1011864
2025	9.006665	115.403839	158.483475	146.488327	17.163887	1	1134840	1519118

## Lampiran 9 (lanjutan)

Tahun	Biaya kesehatan	Biaya lingkungan	Nilai produksi listrik	Manfaat bersih	PVNetben
1993	0	0	0	5997.716797	5997.716797
1994	0	0	0	6483.532227	6483.532227
1995	0	0	0	7008.698242	7008.698242
1996	0	0	0	7576.402344	7576.402344
1997	0	0	0	8190.091309	8190.091309
1998	0	0	0	8853.489258	8853.489258
1999	0	0	0	9570.622070	9570.622070
2000	0	0	0	10345.840820	10345.840820
2001	0	0	0	11183.854492	11183.854492
2002	0	0	0	12089.747070	12089.747070
2003	0	0	0	13069.015625	13069.015625
2004	0	0	0	14127.607422	14127.607422
2005	0	0	0	15271.943359	15271.943359
2006	0	0	0	16508.970703	16508.970703
2007	0	0	0	17846.197266	17846.197266
2008	0	0	0	19291.740234	19291.740234
2009	0	0	0	20854.371094	20854.371094
2010	0	0	0	22543.574219	22543.574219
2011	0	0	0	24369.605469	24369.605469
2012	1.150854	0.107341	1.258195	26343.542969	26342.285156
2013	3.052450	0.318274	3.370724	28477.369141	28473.998047
2014	6.106771	0.666232	6.773003	30784.035156	30777.261719
2015	10.941418	1.203055	12.144472	33277.539063	33265.394531
2016	18.503548	2.035382	20.538930	35973.023438	35952.484375
2017	30.216301	3.323793	33.540094	38886.839844	38853.300781
2018	48.209984	5.303098	53.513082	42036.671875	41983.156250
2019	75.663399	8.322974	83.986373	45441.648438	45357.660156
2020	117.307068	12.903777	130.210845	49122.421875	48992.210938

## Lampiran 9 (lanjutan)

<b>Tahun</b>	<b>Biaya kesehatan</b>	<b>Biaya lingkungan</b>	<b>Nilai produksi listrik</b>	<b>Manfaat bersih</b>	<b>PVNetben</b>
2021	180.164017	19.818041	199.982058	53101.335938	52901.355469
2022	274.640198	30.210423	304.850620	57402.542969	57097.691406
2023	416.127167	45.773987	461.901154	62052.148438	61590.246094
2024	627.355835	69.009140	696.364975	67078.375000	66382.007813
2025	941.853271	103.603859	1045.457130	72511.726563	71466.273438

## Lampiran 10

Perubahan algoritma Vensim pada intervensi struktural sub-model pencemaran gas SO<sub>2</sub>

- (42) harga satuan listrik=  
 IF THEN ELSE(Time < 2015 , 495 \* 10<sup>9</sup> , IF THEN ELSE(Time < 2020, kebijakan listrik \* 495 \* 10<sup>9</sup> , kebijakan listrik \* kebijakan listrik \* 495 \* 10<sup>9</sup>))  
 Units: Rupiah/Year
- (47) kebijakan BME=  
 0.7  
 Units: \*\*undefined\*\*
- (48) kebijakan listrik=  
 1.5  
 Units: \*\*undefined\*\*
- (50) Konsentrasi SO2 Kedua= INTEG (  
 IF THEN ELSE(Time < 2015, Konsentrasi Ambien SO2 \* ((0.5)<sup>waktu paruh SO2</sup>) , Konsentrasi Ambien SO2 \* kebijakan BME \* ((0.5)<sup>waktu paruh SO2</sup>) ),0)  
 Units: ppm

Lampiran 11  
 Matriks variabel acuan dalam pengembangan model  
 alternatif kebijakan

Skenario	Pertumb. Penduduk	Pertumb. PDRB	Pertumb. Prod. Listrik	Harga satuan listrik	Pertumb. BBM	Pertumb. Kendaraan
Status Quo (BAU)	0.0040	0.0360	0.0810	495*10 <sup>9</sup>	0.2070	0.1340
Economic Driven (EC-D)	0.0050	0.0513	0.1000	635*10 <sup>9</sup>	0.2500	0.1500
Environmental Driven (EN-D)	0.0030	0.0420	0.0600	160*10 <sup>9</sup>	0.1500	0.0800

## Lampiran 12

Data hasil simulasi sistem dinamik dan data kualitatif untuk pembobotan dalam mengembangkan model kebijakan alternatif

Skenario	PDRB	Produksi Listrik	Kendaraan	BBM	Biaya Kesehatan & Lingkungan	Manfaat Bersih	PVNetben
Status Quo (BAU)	158.483475	146.488327	115.403839	3219.466	1146532.672	71406.70313	2.67E+13
Economic Driven (EC-D)	253.352478	255.827209	180.689682	9868.964	4223.14322	158227.125	3.49E+13
Environmental Driven (EN-D)	190.650925	78.193115	24.219351	684.6715	146.48833	12505.66211	8.43E+12

Sakit Pernafasan	Mortalitas Prematur	Sakit LRI	Sakit CDA	Konsentrasi SO2	Konsentrasi NO2	Laju Degradasi	Lembaga	Biaya Penerapan Kebijakan	SDM
1519118	726045	2790088	3790993	1827.956299	17.163887	2017	Keterlibatan pasif	Rendah	Rendah
5722788	810003	2914904	3960585	1868.951904	63.460072	2015	Keterlibatan sedang	Tinggi	Sedang
7293	707035	2717035	3691733	1811.898315	0.113727	2030	Keterlibatan aktif	Sedang	Tinggi

Lampiran 13  
Perbandingan data hasil simulasi sistem dinamik  
pada sub-model pencemaran gas SO<sub>2</sub>

Tahun	Manfaat Bersih SO <sub>2</sub> Tanpa Kebijakan (Milyar Rupiah)	Manfaat Bersih SO <sub>2</sub> Dengan Kebijakan (Milyar Rupiah)	PVNetben SO <sub>2</sub> Tanpa Kebijakan (Milyar Rupiah)	PVNetBen SO <sub>2</sub> Dengan Kebijakan (Milyar Rupiah)	Perbedaan PVNetBen
1993	5997.716797	5997.716797	5705.205078	5705.205078	0
1994	6483.532227	6483.532227	17115.61523	17115.61523	0
1995	7008.698242	7008.698242	40398.55469	40398.55469	0
1996	7576.402344	7576.402344	87463.98438	87463.98438	0
1997	8190.091309	8190.091309	182134.875	182134.875	0
1998	8853.489258	8853.489258	372060.4063	372060.4063	0
1999	9570.622070	9570.62207	752542.5	752542.5	0
2000	10345.840820	10345.84082	1514188.875	1514188.875	0
2001	11183.854492	11183.85449	3038219	3038219	0
2002	12089.747070	12089.74707	6087076.5	6087076.5	0
2003	13069.015625	13069.01563	12185653	12185653	0
2004	14127.607422	14127.60742	24383738	24383738	0
2005	15271.943359	15271.94336	48780912	48780912	0
2006	16508.970703	16508.9707	97576352	97576352	0
2007	17846.197266	17846.19727	195168416	195168416	0
2008	19290.984375	19290.98438	390353792	390353792	0
2009	20841.996094	20841.99609	780725888	780725888	0
2010	22508.144531	22508.14453	1561471616	1561471616	0
2011	24289.167969	24289.16797	3122964480	3122964480	0
2012	26175.193359	26175.19336	6245952000	6245952000	0
2013	28137.144531	28137.14453	12491929600	12491929600	0
2014	30107.808594	30107.80859	24983885824	24983885824	0
2015	31944.521484	48583.29688	49967800320	49967800320	0
2016	33356.230469	51726.98047	99935633408	99935649792	-16384
2017	33760.871094	54340.38672	1.99871E+11	1.99871E+11	-49152
2018	32006.582031	55631.36328	3.99743E+11	3.99743E+11	-98304
2019	25826.794922	54028.58984	7.99485E+11	7.99486E+11	-196608
2020	10775.121094	83277.95313	1.59897E+12	1.59897E+12	-524288
2021	-21856.101563	66602.51563	3.19794E+12	3.19794E+12	-1048576
2022	-89103.906250	26195.03906	6.39588E+12	6.39588E+12	-2097152
2023	-224284.812500	-61225.60938	1.27918E+13	1.27918E+13	-4194304
2024	-492531.625000	-241208.5938	2.55835E+13	2.55835E+13	-8388608
2025	-1021156.750000	-602825.5	5.11671E+13	5.11671E+13	-16777216