

Produksi Cahaya

Artoto Arkundato, S.Si., M.Si.



PENDAHULUAN

Optika adalah cabang fisika yang berkenaan dengan asal usul dan perambatan cahaya, bagaimana cara menghasilkan cahaya, mempelajari fenomena-fenomena fisis yang berkaitan dengan hal tersebut sampai penerapan-penerapan yang dapat dieksplorasi dari fenomena tersebut. Beberapa terapan penting dari optik yang hadir dalam kehidupan kita adalah sepertiacamata, kamera, teleskop dan lain-lain. Untuk mempelajari hal ihwal optik maka oleh karena itu, sangat tepat jika pembahasan kita dimulai dengan mengenal sifat-sifat cahaya itu sendiri. Konsep-konsep ini termasuk di antaranya adalah apakah cahaya itu, bagaimana cahaya diciptakan atau diproduksi, bagaimana cahaya merambat sampai cahaya sebagai gelombang elektromagnetik.

Modul 1 ini dibagi menjadi dua kegiatan belajar. Kegiatan Belajar 1 membicarakan pengukuran cahaya yang termasuk di dalamnya mengenai teori cahaya, spektrum gelombang elektromagnetik, radiometri dan fotometris. Kegiatan Belajar 2 mengenai *jenis-jenis radiasi* dan di dalamnya akan membahas, sumber radiasi sampai detektor radiasi. Materi dalam kegiatan belajar yang sedang Anda pelajari ini merupakan dasar dari materi pada modul selanjutnya, oleh karena itu pelajarilah dengan cermat agar dapat menyerap materi yang diberikan dengan baik. Setelah mempelajari modul ini diharapkan Anda dapat:

1. Menjelaskan sifat-sifat cahaya, cahaya sebagai gelombang elektromagnetik dan besaran-besaran dalam pengukuran cahaya.
2. Menjelaskan model-model perilaku cahaya.
3. Menjelaskan jenis-jenis radiasi, sumber radiasi dan cara mendeteksinya.

4. Memecahkan permasalahan yang berkaitan dengan cahaya.

Selanjutnya untuk meningkatkan pemahaman Anda dalam mempelajari modul ini, untuk setiap kegiatan belajar akan diberikan beberapa contoh soal beserta penyelesaiannya, latihan beserta jawabannya, ringkasan kuliah, glosarium, serta ujian formatif yang jawabannya diberikan pada akhir modul. Untuk mengukur benar-benar kemampuan Anda disarankan kerjakan dulu ujian formatif tanpa melihat terlebih dahulu jawaban yang diberikan pada akhir modul.

Materi yang disajikan dalam Buku Materi Pokok OPTIKA ini meskipun diusahakan dapat menampung hal-hal mendasar tentang optika dan juga perkembangannya dewasa ini, namun tentu saja masih terdapat kekurangan di sana-sini. Oleh karena itu, mahasiswa sangat dianjurkan untuk tidak puas hanya mendapatkan materi dari Buku Materi Pokok ini. Bahan-bahan pembahasan tentang optika banyak terdapat di internet yang dapat diakses secara langsung oleh mahasiswa.

KEGIATAN BELAJAR 1**Pengukuran Cahaya****A. TEORI CAHAYA**

Pembahasan optika barangkali sangat baik jika diawali dengan pertanyaan menyangkut hal yang sangat penting dari fenomena optik itu sendiri, yaitu “apakah cahaya itu?”. Jawaban dari pertanyaan ini tentu saja tidak lain berbicara mengenai teori cahaya. Teori modern cahaya mengatakan bahwa cahaya adalah salah satu bagian dari berbagai macam gelombang elektromagnetik. Sebelum sampai ke konsep cahaya sebagai gelombang elektromagnetik (selanjutnya kita sebut gelombang EM) maka kita pelajari dulu sifat-sifat cahaya.

1. Sifat-sifat Cahaya

Sampai sekitar pertengahan abad 17 umumnya dianut paham bahwa cahaya adalah kumpulan dari butiran-butiran (*corpuscles*) yang mengalir. Butiran-butiran ini dipancarkan oleh sumber cahaya seperti matahari, api lilin dan lain-lain serta memancar keluar dari sumber tersebut mengikuti lintasan lurus. Cahaya (aliran butiran) ini dapat menembus bahan bening (misalnya prisma) dan dapat dipantulkan oleh suatu permukaan kusam. Jika aliran butiran ini mengenai mata kita maka timbul kesan penglihatan, seperti yang kita alami.

Jika uji kecukupan sebuah teori hanya didasarkan pada kemampuannya untuk menerangkan bukti-bukti eksperimen yang ada dengan sesedikit mungkin hipotesa maka kita harus mengakui bahwa teori “butiran” tersebut adalah sebuah teori yang unggul. Mengapa demikian? Teori tersebut dapat menerangkan mengapa cahaya bergerak lurus, mengapa dapat dipantulkan oleh permukaan halus seperti cermin, sampai mengapa dapat dibiaskan saat melewati bidang batas antar medium transparan yang berbeda. Teori butiran yang berpijak pada gerak lintasan dalam hal ini dapat menjelaskan hal-hal di atas dengan cara yang sederhana.

Segera melewati pertengahan abad 17, sementara banyak ilmuwan menerima teori butiran ini, ide *cahaya sebagai gelombang* mulai tumbuh. Christian Huygens (1670) menunjukkan bahwa dengan menggunakan teori gelombang maka hukum pembiasan dan pemantulan cahaya dapat diterangkan. Bahkan dengan teori gelombang ini fenomena pembiasan ganda dapat diterangkan. Meskipun demikian, di samping penerimaan segera dari ilmuwan untuk teori gelombang ini, juga masih ada kegagalan berkaitan dengan gejala gelombang itu sendiri. Penolakan ini adalah jika cahaya adalah gerak gelombang maka seharusnya dapat dibelokkan mengelilingi penghalang seperti halnya yang terjadi pada gelombang air.

Adalah pada tahun 1825 eksperimen interferensi cahaya Thomas Young dan Augustin Fresnel serta pengukuran kecepatan cahaya oleh Leon Foucault (1850), menunjukkan keberadaan fenomena optik tidak cukup hanya dengan teori butiran. Fenomena interferensi dan difraksi hanya akan dapat diterangkan dengan baik jika kita menganggap cahaya adalah sebuah gerak gelombang. Percobaan Thomas Young mengizinkan kita dapat mengukur panjang gelombang cahaya sedangkan percobaan Fresnel menunjukkan kepada kita akan gerak lurus cahaya di samping dapat menerangkan fenomena difraksi cahaya. Cahaya sebagai gelombang dengan sifat-sifat dapat berinterferensi, terdifraksi dapat diukur lajunya dalam percobaan Foucault dengan laju 3×10^8 m/det.

Sifat eksak gelombang cahaya dan medium rambat cahaya, namun demikian masih belum terselesaikan. Menurut pemahaman saat itu, sebuah gelombang membutuhkan medium rambat. Medium *ether* seperti yang digagas Huygens sebagai medium tempat cahaya merambat masih menunjukkan hal yang tidak konsisten. Jika gelombang cahaya adalah gelombang elastik seperti halnya gelombang suara maka agar mempertimbangkan kemungkinan untuk laju besar dari perambatan cahaya maka *ether* tersebut harus sangat *rigid*, sementara ruang kita di mana *ether* diasumsikan memenuhinya tidaklah seperti itu.

Lompatan besar ke depan berikutnya untuk teori cahaya adalah oleh James Clerk Maxwell (ilmuwan Scotlandia) pada 1873. Kita telah melihat bahwa berdasarkan teori gelombang cahaya (maksudnya cahaya adalah

sebuah fenomena gelombang, bukan teori butiran) dari Young dan Fresnell maka kita menduga cahaya adalah sebuah gerak gelombang. Maxwell memprediksi adanya sebuah gelombang (dinamakan gelombang elektromagnetik) yang memiliki sifat-sifat sebagai berikut.

- a. Gelombang elektromagnetik (gelombang EM) mempunyai komponen medan magnet \vec{B} dan medan listrik \vec{E} yang berosilasi sefase. Dengan kata lain amplitudo maksimum E_0 dari medan listrik dan medan magnet B_0 terjadi pada saat dan di titik yang sama dalam arah rambat. Amplitudo maksimum kedua medan ini dihubungkan dalam persamaan $E_0 = cB_0$.
- b. Gelombang EM bergerak dalam mode transversal.
- c. Gelombang EM ini merambat dalam ruang dengan laju $c = 2,998 \times 10^8$ m/det.
- d. Sifat-sifat gelombang EM secara umum banyak kesamaan dengan sifat-sifat gelombang mekanik yang sudah ada, akan tetapi tidak membutuhkan medium rambat, yaitu dapat bergerak dalam ruang hampa (ruang di mana tidak ada muatan dan arus). Gelombang mekanik memerlukan medium rambat selama gerakan.

Laju gelombang EM ini kira-kira sama dengan laju perambatan cahaya yang diukur Leon Foucoult sebelumnya sebesar 3×10^8 m/det. Oleh karena itu, Maxwell menduga bahwa cahaya adalah salah satu bentuk gelombang EM. Selanjutnya 15 tahun setelah formulasi gelombang EM Maxwell, Heinrich Hertz menunjukkan pembangkitan gelombang pendek yang murni elektromagnetik dan memiliki sifat-sifat gelombang cahaya. Gelombang ini dapat dipantulkan, dibiaskan, difokuskan oleh lensa, dipolarisasikan, dan seterusnya, sebagaimana halnya gelombang cahaya. Oleh karena itu, teori Maxwell bahwa cahaya adalah gelombang elektromagnetik serta pembenaran Hertz secara eksperimen, telah membentuk salah satu pencapaian besar dalam fisika, dimana tampaknya tidak diragukan lagi bahwa cahaya adalah gelombang EM.

Bagaimana dengan *ether* tadi? Gagasan *ether* sebenarnya muncul karena fenomena gelombang yang lain sebelumnya, seperti gelombang mekanik memerlukan medium rambat. Sebagai contoh gelombang suara memerlukan

udara untuk merambat dari satu titik ke titik yang lain. Oleh karena itu, diasumsikan *ether* untuk medium rambat cahaya memenuhi seluruh ruang juga ruang hampa. Agar *ether* ini memenuhi sifat-sifat yang sesuai untuk medium rambat cahaya diasumsikan *ether* bersifat transparan, rapat massanya diabaikan dan juga *rigid* seperti baja. Banyak eksperimen sudah dikerjakan oleh para ilmuwan dan eksperimen yang paling berhasil adalah eksperimen Michelson-Morley (1887) yang menolak adanya medium *ether* tersebut!. Kesimpulan akhir dari sifat-sifat cahaya adalah *gelombang EM yang merambat dengan laju 3×10^8 m/det tanpa medium rambat khusus*.

Gelombang EM selain aplikasinya yang luas dalam perkembangan teknologi juga mempunyai manfaat khusus karena sampai saat ini kita masih mengandalkan gelombang EM untuk mengetahui informasi seputar jagat raya (*universe*) berdasarkan informasi yang dibawa oleh gelombang-gelombang EM yang dapat ditangkap oleh detektor di bumi. Dengan mengetahui informasi mengenai gelombang radio dan mikro yang diterima bumi kita dapat menerima informasi lebih banyak mengenai pusat alam semesta. Sifat-sifat lain dari gelombang EM (cahaya) adalah meskipun tidak memerlukan medium rambat namun dalam medium penghantar tidak dapat merambat jauh akibat serapan atau proses pantulan. Meskipun demikian gelombang EM dapat merambat dalam medium dielektrik tanpa kesulitan, namun lajunya direduksi menurut:

$$c' = \frac{c}{\sqrt{K}} \cong \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{K}} \text{ m/det}$$

dengan K adalah tetapan dielektrik medium. Karena $K > 1$ untuk material dielektrik maka laju cahaya dalam medium dielektrik akan direduksi oleh faktor K tersebut.

Contoh Soal 1:

Sebuah gelombang EM dengan $\lambda = 30$ cm bergerak dalam udara dan memasuki material dielektrik (kuarza) dengan $K = 4,3$. Berapa frekuensi dan panjang gelombang setelah memasuki medium dielektrik?

Penyelesaian:

Kita gunakan rumus gelombang biasa $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda}$. Frekuensi f gelombang

adalah $f = \frac{3 \times 10^8}{0,3} = 1 \times 10^9$ Hz. Laju cahaya dalam medium adalah

$c' = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4,3}} = 1,4 \times 10^8$ m/det. Laju rambat dapat berubah dan besaran yang

tetap adalah *frekuensi* sehingga setelah memasuki medium panjang gelombang menjadi:

$$\lambda_{\text{medium}} = \frac{c'}{f} = \frac{1,4 \times 10^8}{1 \times 10^9} = 14 \text{ cm.}$$

Kita kemudian melihat ternyata teori elektromagnetik klasik gagal menerangkan gejala emisi fotolistrik, yaitu fenomena terlepasnya elektron dari permukaan logam (konduktor) yang disinari. Adalah Einstein (1905) yang mengajukan gagasan (postulat) bahwa energi yang dibawa oleh berkas cahaya yang dalam bentuk medan listrik-magnet dari gelombang EM, sebenarnya dikonsentrasikan dalam bentuk paket kecil yang disebut *foton*. Jadi, kita kembali menganggap cahaya sebagai aliran butiran (teori butiran) yang kita sebut foton. Hanya saja sekarang kita masih mempertahankan gambaran gelombang dari cahaya, yaitu sebuah foton masih dipandang mempunyai frekuensi (sifat gelombang) dan energi foton sebanding dengan frekuensinya menurut rumus:

$$E = hf \tag{1.1}$$

dengan h adalah tetapan Planck yang besarnya kira-kira $6,63 \times 10^{-34}$ J.det dan f adalah frekuensi gelombang. Tentu saja Anda akan bertanya, kalau demikian cahaya itu gelombang atau partikel (butiran)? Meskipun percobaan efek fotolistrik dari Einstein telah membuka kesimpulan bahwa cahaya itu mempunyai sifat partikel, namun ilmuwan pada waktu itu tidak sampai (tidak berani?) pada kesimpulan yang mengatakan bahwa itu adalah dua ungkapan berbeda untuk entitas yang sama. Adalah Louis de Broglie yang berani

mengajukan hipotesa (selanjutnya dikenal dengan hipotesa de Broglie) *dualisme gelombang-materi*. Sebuah entitas pada suatu saat dapat ditelaah menurut aspek gelombangnya, dan pada saat yang lain lebih cocok jika ditelaah menurut aspek partikelnya. Kedua hal ini disatukan dalam persamaan yang terkenal:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (1.2)$$

Kita melihat disini, λ adalah karakteristik dari gelombang sedangkan p (momentum) adalah karakteristik dari partikel. Dalam menerangkan gejala efek fotolistrik, Einstein telah menganggap bahwa cahaya adalah sebuah partikel (disebut foton) yang mempunyai energi $E = hf$. Efek fotolistrik sulit dirumuskan menurut konsep-konsep atau teori elektromagnetik Maxwell!. Percobaan efek fotolistrik dapat Anda pelajari pada mata kuliah lain menyangkut topik fisika modern atau pada fisika kuantum.

Hipotesa de Broglie diperkuat oleh percobaan Davisson-Germer untuk difraksi elektron pada kristal yang membuktikan untuk sifat gelombang dari partikel (elektron). Konfirmasi sifat partikel dari cahaya yang lain adalah percobaan Compton (1921). Dengan meninjau sifat foton dari cahaya yang menumbuk elektron maka Compton berhasil menerangkan adanya pergeseran frekuensi. Oleh karena itu, efek fotolistrik dan efek Compton menawarkan kita kembali ke teori butiran, namun dengan beberapa modifikasi. Dengan hipotesa de Broglie maka cahaya mempunyai sifat dua (ganda). Fenomena perambatan cahaya mungkin paling baik jika diterangkan menurut aspek gelombangnya (teori elektromagnetik Maxwell) sedangkan interaksi cahaya dengan materi dalam proses emisi dan serapan adalah fenomena partikel.

Contoh Soal 2:

Berapakah energi foton yang terkandung dalam suatu berkas cahaya yang mempunyai panjang gelombang 526 nm?

Penyelesaian:

$E = hf = hc / \lambda = (6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{det})(3 \times 10^8 \text{ m/det}) / (526 \times 10^{-9} \text{ m}) = 3,78 \times 10^{-17} \text{ J}$.
 Jika $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ maka $E = 2,36 \text{ eV}$. Untuk mempermudah perhitungan dapat kita definisikan nilai $hc = (6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{det})(3 \times 10^8 \text{ m/det}) \cdot (1,6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}$ sehingga :
 $E = 1240 / \lambda \text{ eV}$ dengan λ dalam satuan nm.

Contoh Soal 3:

Suatu sumber cahaya yang memancarkan warna hijau dengan daya 100 W pada panjang gelombang 500 nm. Berapa banyak foton per detik yang memancar keluar sumber?

Penyelesaian:

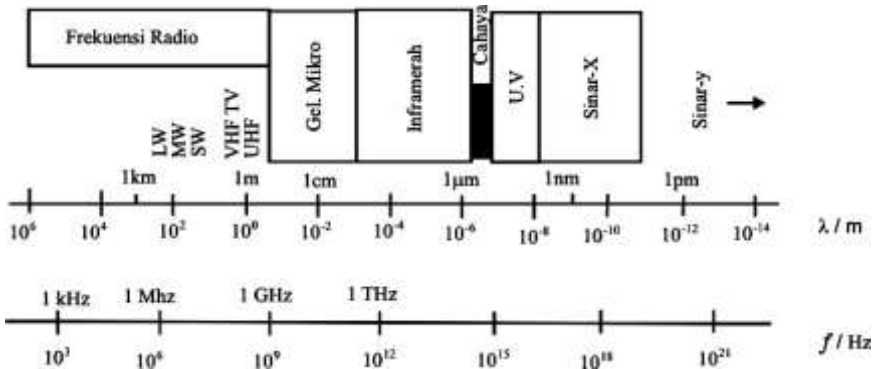
Energi yang dipancarkan adalah daya dikalikan dengan lama waktu pemancaran. Oleh karena itu energi tersebut adalah $(100 \text{ W})(1 \text{ det}) = 100 \text{ J}$. Jika berkas cahaya adalah kumpulan foton maka jumlah foton adalah:

$$N = \frac{100}{hf} = 100 \frac{\lambda}{hc} = \frac{100(500 \times 10^{-9})}{(6,63 \times 10^{-34})(3 \times 10^8)} = 25 \times 10^{19} \text{ foton/detik.}$$

2. Spektrum Gelombang Elektromagnetik

Telah disampaikan bahwa cahaya adalah salah satu bagian dari bermacam-macam gelombang EM. Dalam pengertian lain, gelombang EM memiliki *spektrum* panjang gelombang yang luas, mulai dari gelombang radio dengan panjang gelombang orde satu meter atau lebih sampai turun ke sinar-X dengan orde sepermilyar meter. Secara umum pengertian spektrum adalah berkaitan dengan himpunan dari berbagai macam hal yang berurutan. Gelombang EM membentuk *spektrum* panjang gelombang artinya gelombang EM disusun dari berbagai *range* panjang gelombang. Gambar 1.1 di bawah ini memperlihatkan spektrum gelombang EM. Radiasi optik sendiri yang terbentang antara gelombang radio dan sinar-X memperlihatkan campuran unik sifat-sifat cahaya, gelombang dan sifat-sifat kuantum. Cahaya yang

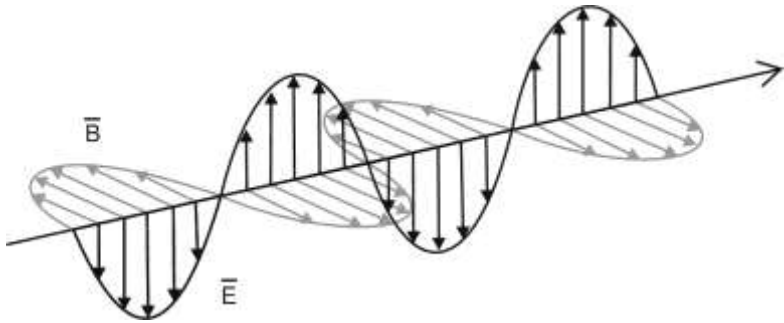
dimaksud adalah cahaya tampak, dengan rentang panjang gelombang 380-770 nm.



Gambar 1.1 Spektrum gelombang elektromagnetik

Pada batas sinar-X atau panjang gelombang yang lebih pendek lagi radiasi elektromagnetik cenderung menunjukkan sifat partikelnya, sedangkan ke arah panjang gelombang panjang (*long waves*) maka radiasi EM lebih cenderung memperlihatkan perilaku gelombang. Cahaya tampak yang berada di bagian tengah dalam hal ini memperlihatkan karakteristik kedua-duanya gelombang dan partikel untuk derajat yang bermacam-macam.

Kemudian menurut teori gelombang, semua gelombang EM yang berjalan di alam ini dalam mode transversal. Demikian pula pada prinsipnya tidak ada batasan besarnya λ panjang gelombang EM yang dapat dihasilkan, dan juga gelombang EM dapat dibangkitkan dengan frekuensi f sekecil mungkin.



Gambar 1.2

Mode rambat gelombang EM. Komponen listrik \vec{E} dan magnet saling tegak lurus dan keduanya juga tegak lurus terhadap arah rambat gelombang.

Dengan kaitan antara panjang gelombang dan frekuensi berikut:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.3)$$

maka dapat diperkirakan, jika $f = 60$ siklus/det maka λ adalah 5×10^6 m = 5000 km!.

a. *Cahaya ultraviolet*

Cahaya UV merupakan bagian dari spektrum gelombang EM. Cahaya UV dengan panjang gelombang pendek memperlihatkan sifat-sifat kuantum lebih kuat daripada cahaya tampak dan inframerah. Cahaya UV dipecah lagi menjadi tiga pita menurut efek yang ditimbulkan, yaitu UV-A, UV-B dan UV-C. UV-A (100 – 200nm) adalah tipe yang paling sering dijumpai dan paling tidak berbahaya karena paling sedikit energinya. Cahaya UV-A ini juga sering disebut cahaya hitam, dan karena kurang berbahayanya maka biasa digunakan untuk *phototherapy*. UV-B(280 – 315 nm) adalah UV paling berbahaya karena mempunyai cukup energi untuk merusak jaringan hidup namun tidak cukup kuat untuk secara sempurna diserap oleh atmosfer. UV-B ini dapat menyebabkan kanker. UV-B yang berasal dari luar angkasa banyak ditahan oleh atmosfer sehingga perubahan kecil lapisan ozon berakibat

fatal menambah bahaya kanker kulit. UV-C (315 – 400 nm) hampir secara sempurna diserap oleh udara. Jika UV-C bertumbukan dengan atom oksigen pertukaran energinya menyebabkan formasi ozon. UV-C hampir tidak pernah teramati di alam karena jenis cahaya UV ini cepat sekali terserap. Lampu UV-C sering digunakan untuk menjernihkan air karena kemampuannya membunuh bakteri.

b. *Cahaya Tampak*

Cahaya tampak juga merupakan bagian dari gelombang EM dan mudah sekali teramati oleh indra kita. Cahaya dapat dibagi menjadi beberapa bagian spektrum (teramati sebagai warna), seperti pada tabel berikut ini.

Tabel 1.1 Spektrum warna cahaya tampak

Warna	λ (nm)	F (10^{12} Hz)
Merah	780 - 622	384 - 482
Oranye	622 - 597	482 - 503
Kuning	597 - 577	503 - 520
Hijau	577 - 492	520 - 610
Biru	492 - 455	610 - 659
Violet	455 - 390	657 - 769

c. *Cahaya Inframerah (Ir)*

Cahaya IR juga termasuk gelombang EM dan mempunyai paling sedikit jumlah energi per foton dibanding sembarang pita gelombang EM yang lain. Spektrum IR sendiri dibagi menjadi dua bagian pita spektrum, yaitu *far-IR* (1,4 - 1000 μ m) dan *near-IR* (770 – 1400 nm).

Selanjutnya, bagaimanakah cahaya-cahaya tersebut dibangkitkan atau berasal? Cahaya muncul dari proses-proses mikroskopis, dan untuk proses yang berbeda akan menghasilkan gelombang EM yang berbeda (λ beda). Seperti misalnya cahaya tampak dari hasil penyusunan ulang elektron bagian luar dari atom atau molekul, gelombang radio dari gerak elektron dalam antena, inframerah dibangkitkan dari rotasi dan vibrasi molekul, sinar-X hasil elektron bagian dalam di eksitasi serta sinar- γ muncul dari proses-proses nuklir. Sekali lagi perilaku gelombang EM pada frekuensi rendah baik jika ditelaah menggunakan teori gelombang

klasik sedangkan untuk frekuensi tinggi memerlukan teori kuantum. Sebagai contoh, untuk efek fotolistrik tidak dapat digambarkan dengan teori gelombang klasik dan mengharuskan kita menelaah menurut konsep fisika kuantum.

B. RADIOMETRI

Radiometri adalah hal ihwal tentang bagaimana mengukur energi yang terkandung dalam medan radiasi optik dan juga menentukan bagaimana energi ini mengalir melalui sistem optik. Rumusan yang tepat untuk mendiskusikan perpindahan (*transport*) energi oleh medan radiasi bergantung secara kritis pada koherensi radiasi. Radiasi optik (akan kita pelajari pada Kegiatan Belajar 2) dapat kita kelompokkan sebagai radiasi koheren, koheren parsial dan tak koheren. Sifat-sifat radiometrik radiasi koheren dapat kita pelajari dengan meninjau vektor Poynting serta rapat fluks radiasinya.

Problem radiometri namun demikian biasanya dimulai dengan menentukan aliran energi dari medan-medan radiasi tak koheren yang penting. Sumber radiasi termal dalam hal ini adalah contoh dari sumber radiasi yang tak koheren. Jika untuk radiasi koheren, amplitudo dan fase medan optik berfluktuasi secara tetap maka radiasi tak koheren akan berfluktuasi acak. Dalam radiasi termal, radiasi yang dipancarkan bersifat acak dalam fase dan amplitudo, sebab bermacam-macam elemen dari sumber memancarkan radiasi yang tidak bergantung satu sama lain. Oleh karena itu, hasil dari superposisi sejumlah besar gelombang-gelombang bebas bergabung dengan cara stokastik.

Hukum radiometri tradisional didasarkan pada beberapa asumsi. Pertama, seperti telah disinggung di atas, sumber radiasi adalah tak koheren. Kemudian diasumsikan bahwa perambatan radiasi ini baik di ruang hampa atau melalui sistem optik dapat diatasi menggunakan hukum-hukum optika geometri, khusus untuk energi radiasi. Jadi hukum radiometri tidak dapat digunakan untuk problem-problem di mana efek interferensi dan difraksi ada secara dominan, karena efek-efek ini dapat menyebabkan aliran energi dalam arah yang berbeda dari arah sinar optika geometri. Asumsi terakhir adalah

energi medan optik bersifat kekal sepanjang medan-medan tersebut merambat melalui medium transparan (medium tak menyerap).

Selanjutnya telah dibuktikan bahwa akan berguna jika mendefinisikan sejumlah besaran-besaran radiatif untuk menggambarkan energi yang dikandung medan-medan radiasi inkoheren. Besaran-besaran ini adalah:

Tabel 1.2 Besaran-besaran dalam radiometri

Besaran	Simbol	Definisi	Satuan
Energi radiasi	Q	$\int \Phi dt$	J
Rapat energi radiasi	u	dQ/dV	J/m ³
Fluks radiasi (daya)	Φ, P	dQ/dt	W
Iradiansi	E	$d\Phi/dA$	W/m ²
Radiansi	L	$d^2\Phi/dA_{\text{proj}}d\Omega$	W/m ² sr
Intensitas radiasi	I	$d\Phi/d\Omega$	W/sr

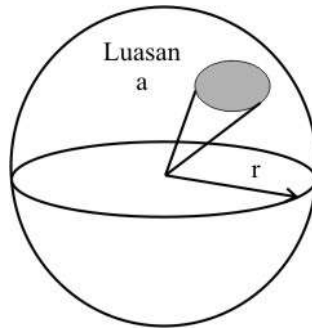
Energi total yang dikandung di dalam medan radiasi atau energi total yang dikirimkan ke suatu penerima oleh suatu medan radiasi disebut energi radiasi Q . Rapat energi didefinisikan dengan:

$$u = dQ/dV \quad (1.4)$$

dengan dQ adalah energi radiasi untuk elemen volume dV medan radiasi. Fluks radiasi Φ dipandang ekuivalen dengan daya P yaitu laju dQ/dt di mana energi radiasi dipindahkan dari satu wilayah ke wilayah yang lain oleh medan radiasi. Irradiansi E adalah fluks per satuan luas yang diterima oleh baik riil maupun elemen permukaan semu, yaitu

$$E = d\Phi/dA \quad (1.5)$$

Selanjutnya kita juga memerlukan konsep sudut ruang (*solid angle*).



Gambar 1.3
Sudut ruang oleh sumber titik di dalam bola

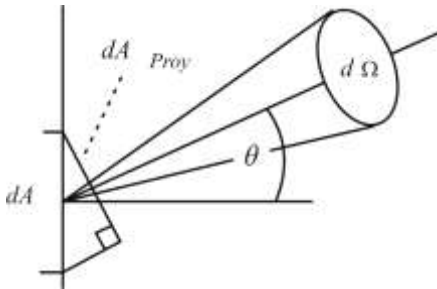
Sudut ruang Ω adalah sudut dalam satuan steradian (sr) yang didefinisikan dengan

$$\Omega = \frac{a}{r^2} \quad (1.6)$$

dengan a adalah luasan pada permukaan bola yang diikat oleh kerucut seperti dalam gambar. Jari-jari bola adalah r . Radiansi L adalah fluks per satuan luas proyeksi per satuan sudut ruang yang keluar dari sumber. Jika $d^2\Phi$ adalah fluks yang dipancarkan ke dalam sudut ruang $d\Omega$ oleh elemen sumber luasan proyeksi dA_{proy} maka radiansi adalah:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA_{\text{proy}}d\Omega} \quad (1.7)$$

di mana luasan proyeksi adalah $dA_{\text{proy}} = dA \cos\theta$, seperti pada gambar berikut.



Gambar 1.4
Definisi luasan proyeksi

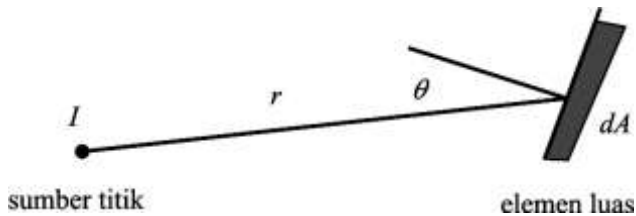
dengan θ adalah sudut antara normal bidang keluar dari elemen luas dA dan arah pengamatan. Kita akan melihat bahwa *radiansi* memainkan aturan penting dalam radiometri karena ini kekal untuk perambatan melalui sistem optik tanpa kehilangan radiasi (*lossless*). Radiansi sering dipandang sebagai kecerahan (*brightness*).

Intensitas radiasi I adalah fluks per satuan sudut ruang yang dipancarkan oleh seluruh sumber pada arah yang diberikan, oleh sebab itu dapat dinyatakan dengan,

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1.8)$$

dengan $d\Phi$ adalah fluks yang dipancarkan ke dalam sudut ruang $d\Omega$. Meskipun intensitas radiasi dapat didefinisikan untuk sembarang sumber, namun sering lebih berguna jika radiasi dipandang sebagai hasil dari sumber titik. Gambar berikut menggambarkan iluminasi (penyinaran) elemen permukaan oleh sumber titik dengan intensitas I . Elemen permukaan ini diikat oleh sudut ruang seperti pada rumusan di atas, $d\Omega = dA \cos \theta / r^2$. Oleh karena itu, fluks yang mengenai elemen permukaan diberikan oleh $d\Phi = I dA \cos \theta / r^2$ dan menurut rumusan sebelumnya maka iradiansi pada dA adalah:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{I \cos \theta}{r^2} \quad (1.9)$$



Gambar 1.5
Iluminasi dari suatu sumber titik

Hasil ini menggambarkan satu bentuk dari hukum kosinus Lambert bahwa iradiansi berkurang terhadap sudut datang dalam $\cos(\theta)$. Persamaan ini juga merupakan hukum kuadrat terbalik iradiansi terhadap r . Namun demikian, hukum kuadrat terbalik sebenarnya hanya cocok untuk sumber titik, yaitu sumber yang dimensinya sangat kecil dibandingkan jarak dari sumber ke titik yang menerima radiasi.

Perlu dicatat di sini, bahwa istilah intensitas di sini sangat berbeda makna untuk kajian optika fisis di mana intensitas erat dipandang sebagai vektor Poynting dan dalam radiometri ini lebih dekat dengan pengertian iradiansi yaitu jumlah energi yang menyinari sebuah permukaan.

C. PEMODELAN CAHAYA

Studi optik memerlukan model-model perilaku cahaya. Dengan model ini kita dapat memprediksi fenomena cahaya. Kajian tradisional optik biasanya dibagi ke dalam *optika geometris* dan *optika fisis*. Dalam hal ini sekarang dikembangkan cabang ketiga, yaitu *optika kuantum*.

Optika fisis meninjau fenomena cahaya berdasarkan sifat-sifat gelombang dan oleh karena itu optika fisis sering disebut dengan *optika gelombang*. Pendekatan ini bekerja dengan baik jika perubahan-perubahan energi dapat diabaikan. Dengan model ini kita dapat menggambarkan dengan baik gejala difaksi, interferensi dan polarisasi.

Optika geometris adalah pendekatan yang lain untuk fenomena cahaya jika panjang gelombang cahaya sangat kecil dibandingkan dengan obyek yang sedang dalam peninjauan. Dengan ini kita menganggap cahaya sebagai

sinar yang merambat dalam lintasan lurus. Pendekatan ini cukup akurat untuk kajian lensa dan teleskop.

Optika kuantum, cabang optik yang terbaru yang merupakan pendekatan yang terbaik yang ada namun sangat kompleks (rumit). Pendekatan ini diperlukan jika kita melihat adanya interaksi antara cahaya dengan materi dan ada perubahan energi yang signifikan, contohnya untuk memahami efek fotolistrik, laser, devais elektro-optik, kriptografi dll. Kajian optika kuantum pada dasarnya memerlukan pemahaman mekanika kuantum.

Dalam tinjauan optika fisis, kita menelaah cahaya dari aspek gelombangnya. Gelombang EM sesuai dengan namanya mempunyai komponen medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus dan bergerak dalam arah tranversal. Sebarang sumber gelombang EM dalam hal ini disebut *radiator*, dan yang membawa energi yang disalurkan oleh gelombang tersebut dikenal sebagai *energi radiasi*. Istilah umum untuk proses di mana energi radiasi dibangkitkan disebut *radiasi*. Sebagai contoh khusus, energi termal suatu padatan yang diubah menjadi energi radiasi maka proses tersebut disebut *radiasi termal*.

Secara matematis, John Henry Poynting (1852–1914) telah mendemonstrasikan bahwa hadirnya medan listrik-magnet pada titik yang sama dalam ruang menghasilkan aliran energi medan. Bukti ini disebut teorema Poynting dan besaran terkait adalah vektor Poynting, yaitu:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (1.10)$$

Masing-masing adalah \vec{S} vektor Poynting, \vec{E} medan listrik dan $\vec{H} = \vec{B} / \mu$ adalah kuat medan magnet. Vektor Poynting mempunyai satuan $J/(m^2 \cdot \text{det})$. Vektor Poynting ini menyatakan energi radiasi yang mengenai sebuah luasan satuan per satuan waktu, atau juga energi radiasi yang dipancarkan oleh sumber per satuan waktu per satuan luas. Pada frekuensi optik \vec{E} , \vec{H} yaitu \vec{B} , \vec{S} berosilasi cepat sekali sehingga pengukuran sesaat nilai \vec{S} secara langsung menjadi tidak praktis. Oleh karena itu, dihitung \vec{S} secara rata-rata dalam interval waktu yang sesuai. Nilai $\langle \vec{S} \rangle$ ini disebut

rapat fluks radian mempunyai satuan W/m^2 yang juga disebut *intensitas gelombang cahaya* I .

Di dalam radiometri rapat fluks radian jika mengenai sebuah permukaan dinamakan *iradians* (jumlah energi yang mengalir tegak lurus luasan satu satuan per satuan waktu) dengan satuan W/m^2 dengan simbol $I = \langle \vec{S} \rangle$. Bagaimana kita menghitung nilai $\langle \vec{S} \rangle$?. Jika kita misalkan gelombang EM harmonik mempunyai bentuk berikut:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(kx - \omega t) \tag{1.11}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \cos(kx - \omega t) \tag{1.12}$$

maka kita dapat menghitung vektor Poynting adalah:

$$\vec{S} = c^2 \epsilon_0 \vec{E} \times \vec{B} = c^2 \epsilon_0 \vec{E}_0 \times \vec{B}_0 \cos^2(kx - \omega t) \tag{1.13}$$

Oleh karena itu, rata-rata waktu vektor Poynting adalah

$$\langle \vec{S} \rangle = c^2 \epsilon_0 \left| \vec{E}_0 \times \vec{B}_0 \right| \langle \cos^2(kx - \omega t) \rangle \tag{1.14}$$

Harga rata-rata fungsi waktu dapat kita evaluasi untuk interval waktu selama T' sehingga:

$$\langle \cos^2(kx - \omega t) \rangle = \frac{1}{T'} \int_t^{t+T'} \cos^2(kx - \omega t') dt' \tag{1.15}$$

Untuk T' yang besar maka nilai rata-rata ini sama dengan rata-rata pada satu periode tunggal T sehingga hasilnya adalah:

$$\langle \cos^2(kx - \omega t) \rangle = \frac{1}{2} \quad (1.16)$$

Dengan demikian karena $E_0 = cB_0$ dan $\vec{E} \perp \vec{B}$ maka dapat kita hitung iradiansi gelombang EM adalah:

$$\langle S' \rangle = I = \frac{c\epsilon_0}{2} E_0^2 = \frac{1}{2c\mu_0} E_0^2 \quad (1.17)$$

Contoh Soal 4:

Sebuah gelombang elektromagnetik berbentuk gelombang bidang merambat dalam ruang hampa membawa medan listrik \vec{E} (juga dipandang sebagai medan optik) dengan komponen $E_x = E_y = 0$ dan $E_z = 100 \sin \left[8\pi x 10^{14} \left(t - \frac{x}{c} \right) \right]$ dengan c adalah laju rambat cahaya.

Hitunglah rapat fluks yang bersangkutan?

Penyelesaian:

$$I = \frac{c\epsilon_0}{2} E_0^2 \text{ dengan } \epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}. \text{ Karena } E_0 = 100 \text{ mV}$$

maka dapat kita hitung:

$$I = \frac{(3 \times 10^8)(8,85 \times 10^{-12})100^2}{2} = 13,3 \text{ W/m}^2.$$

Contoh Soal 5:

Sebuah berkas laser mempunyai tampang lintang $2,0 \text{ mm}^2$ dan daya $0,80 \text{ mW}$. Berapakah intensitas berkas dan juga besar medan listrik magnet laser tersebut?

Penyelesaian:

Jika kita asumsikan bahwa berkas mengandung gelombang bidang sinusoidal tunggal maka:

$$I = P/A = (8,0 \times 10^{-4}) / (2,0 \times 10^{-6}) = 400 \text{ W/m}^2. \text{ Kemudian } E_0 = [2I/(c\epsilon_0)]^{1/2} = 550 \text{ V/m}$$

dan $B_0 = E_0/c = 1,83 \mu\text{T}$.

D. FOTOMETRI

Fotometri berkenaan dengan pengukuran radiasi optik sebagaimana yang dikesan oleh mata (retina) manusia terhadap radiasi datang. Jadi jika dalam radiometri berkenaan dengan pengukuran semua energi radiasi maka dalam fotometri hanya berkenaan dengan bagian cahaya tampak dari spektrum tampak. Untuk fotometri maka rapat fluks disebut *iluminans (illuminance)* dengan satuan lumen/m². Baik radiometri maupun fotometri menggunakan satuan pengukuran sendiri.

Contoh Soal 6:

Cahaya dari lampu proyeksi (OHP) memberikan iluminasi 12.000 lumen/m² pada sebuah dinding dalam arah tegak lurus cahaya pada jarak 5 m dari sumber. Berapa intensitas yang harus dimiliki sumber isotropik jika ingin menghasilkan iluminasi yang sama pada jarak 5 m?

Penyelesaian:

Untuk sumber isotropik dan arah datang cahaya tegak lurus bidang maka $E = I/r^2$. Oleh karena itu, $I = Er^2 = (12,000 \text{ lm/m}^2)(5\text{m})^2 = 3 \times 10^5 \text{ cd}$.

Contoh Soal 7:

Sebuah lampu 40 W, 110 V menghasilkan 11,0 lm/W. Pada jarak berapakah dari lampu tersebut akan memberikan iluminasi maksimum 5 lm/m²?

Penyelesaian:

Jika kita asumsikan bahwa lampu tersebut merupakan sumber isotropik maka $E_{maks} = F/(4\pi r^2) = I/r^2$. Dari soal $F = (40\text{W})(11 \text{ lm/m}^2) = 440 \text{ lm}$, dan $I = F/(4\pi) = 35 \text{ cd}$. Dari soal $E_{maks} = 5 \text{ lm/m}^2$ sehingga $5 = 35/r^2 \rightarrow r = 2,65 \text{ m}$.



LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Hitunglah frekuensi, panjang gelombang, energi dalam Joule untuk foton yang mempunyai energi 2 eV?
- 2) Tentukan laju, frekuensi, panjang gelombang, perioda, dan amplitudo medan listrik E dari gelombang bidang EM yang medan listriknya adalah berbentuk:

$$E_x = 100 \sin \pi(3 \times 10^6 z - 9 \times 10^{14} t); \quad E_y = E_z = 0$$

- 3) Sebuah sumber gelombang EM monokromatis pada 60 W meradiasikan pada ke seluruh arah merata dan kemudian radiasinya di monitor pada jarak 2 m. Tentukan amplitudo E medan radiasi yang ditangkap oleh detektor?
- 4) Gelombang EM bidang merambat dalam ruang pada arah sumbu y . Jika medan listrik \vec{E} terpolarisasi linear dalam bidang yz dan $\lambda_0 = 500$ nm berapakah medan listrik \vec{B}_0 jika diketahui iradians gelombang tersebut adalah 53,2 W/m²?
- 5) Tentukan iluminasi di suatu titik sejauh 7 ft dari sumber 125 cd, jika (a) permukaan bidang tegak lurus arah berkas sumber (b) permukaan bidang membentuk sudut 15°?

Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) $\lambda = 620$ nm, $f = 480$ THz dan $E = 3,2 \times 10^{-19}$ Joule
- 2) Fungsi gelombang dapat kita modelkan berbentuk $E_x(z, t) = E_{0x} \sin k(z - vt)$. Dengan model ini serta membandingkan dengan medan listrik pada soal maka dapat kita ambil kesimpulan bahwa laju $v = 3 \times 10^8$ m/det. Sementara itu kaitan antara bilangan gelombang k dan panjang gelombang λ adalah $k = 2\pi/\lambda$ sehingga $\lambda = 666$ nm. Sementara itu $v = \lambda f$ sehingga frekuensi f adalah $4,5 \times 10^{14}$ Hz. Perioda gelombang τ dapat dicari yaitu $\tau = 1/f = 2,2 \times 10^{-15}$ detik. Amplitudo gelombang adalah $E_{0x} = 100$ V/m.
- 3) Misalkan luas bola yang membungkus sumber adalah A untuk jari-jari bola r dan I adalah iradiansi pada jarak itu. Maka daya yang

diradiasikan sumber adalah $IA=I(4\pi r^2)$ atau ekuivalen dengan $\langle S \rangle = (4\pi r^2)$. Oleh karena itu:

$$60 = \left(\frac{c\epsilon_0}{2} E_0^2 \right) 4\pi r^2 \rightarrow E_0 = 30 \text{ V/m}$$

4) Dari iradiansi maka $I = \frac{c\epsilon_0 E_0^2}{2} \rightarrow 53,2 = (3 \times 10^8)(8,85 \times 10^{-12})(E_0^2)/2$.

Medan listrik dapat dihitung dari rumus ini yaitu $E_0 = 200 \text{ V/m}$. Kaitan antara E dan B adalah

$$B_0 = E_0/c = 66,7 \times 10^{-8} \text{ T ini berarti :}$$

$$B_x = 66,7 \times 10^{-8} \sin \frac{2\pi}{500 \times 10^{-9}} (y - 3 \times 10^8 t); \quad B_y = B_z = 0.$$

5) $E = E_{maks} = I/r^2 = (125 \text{ cd})/(7 \text{ ft})^2 = 2,55 \text{ lm/ft}^2$. $E = E_{maks} \cos \alpha$ dengan α adalah sudut antara normal bidang dan arah sinar datang. Dalam soal yang dimaksud adalah $\alpha = 85^\circ$ sehingga $E = (2,55 \text{ lm/ft}^2) \cos 85^\circ = 0,222 \text{ lm/ft}^2$.



RANGKUMAN

Optika adalah cabang fisika yang membahas asal-usul cahaya, perambatan cahaya, cara menghasilkan cahaya, mempelajari gejala-gejala fisis yang terkait sampai bagaimana mencari kemungkinan-kemungkinan aplikasi dari teori dan konsep. Cahaya merupakan bagian dari spektrum gelombang elektromagnet, merambat dengan laju $3 \times 10^8 \text{ m/det}$ tanpa medium antara. Ada tiga pendekatan dalam optika: optika geometris, optika fisis dan optika kuantum. Optika geometris cocok digunakan manakala panjang gelombang sangat lebih kecil dibandingkan dengan dimensi objek dalam telaah. Optika fisis sebaliknya berlaku baik jika dimensi sistem dalam peninjauan mendekati besarnya panjang gelombang cahaya. Optika kuantum selanjutnya berguna manakala terdapat interaksi mikroskopik antara medium dengan cahaya, yaitu adanya perpindahan energi dari cahaya ke sistem.

Telaah fisika modern (optika kuantum) memperlihatkan bahwa tinjauan mikroskopik sistem fisis memerlukan konsep *dualisme gelombang partikel*. Ini memberi pilihan kepada kita bahwa untuk sistem fisis mikroskopis (dimensi atom) kita dapat menelaah menurut aspek partikel atau menurut aspek gelombangnya.

Radiometri adalah hal ihwal tentang bagaimana mengukur energi yang terkandung dalam medan radiasi optik, juga menentukan

bagaimana energi ini mengalir melalui sistem optik. Energi total yang dikandung di dalam medan radiasi atau energi total yang dikirimkan ke suatu penerima oleh suatu medan radiasi disebut energi radiasi Q . Rapat energi didefinisikan dengan $u = dQ/dV$ dengan dQ adalah energi radiasi untuk elemen volume dV medan radiasi. Fluks radiasi Φ dipandang ekuivalen dengan daya P yaitu laju dQ/dt di mana energi radiasi dipindahkan dari satu wilayah ke wilayah yang lain oleh medan radiasi. Iradiansi E adalah fluks per satuan luas yang diterima oleh baik riil maupun elemen permukaan semu, yaitu $E = d\Phi/dA$. Intensitas radiasi I adalah fluks per satuan sudut ruang yang dipancarkan oleh seluruh sumber pada arah yang diberikan dapat dinyatakan dengan

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

dengan $d\Phi$ adalah fluks yang dipancarkan ke dalam sudut ruang

$d\Omega$. Meskipun intensitas radiasi dapat didefinisikan untuk sembarang sumber, namun sering lebih berguna jika radiasi dipandang sebagai hasil dari sumber titik. Oleh karena itu, fluks yang mengenai elemen permukaan diberikan oleh $d\Phi = IdA \cos \theta / r^2$ dan menurut rumusan

$$\text{sebelumnya maka iradiansi pada } dA \text{ adalah} \quad E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{I \cos \theta}{r^2}.$$

Istilah umum untuk proses di mana energi radiasi dibangkitkan disebut *radiasi*. Sebagai contoh khusus, energi termal suatu padatan yang diubah menjadi energi radiasi maka proses tersebut disebut *radiasi termal*. Untuk konteks gelombang EM maka kita bicara radiasi EM.

Vektor Poynting \vec{S} menyatakan energi radiasi yang mengenai sebuah luasan satuan per satuan waktu, atau juga energi radiasi yang dipancarkan oleh sumber per satuan waktu per satuan luas. Pada frekuensi optik \vec{E} , \vec{H} yaitu \vec{B} , \vec{S} berosilasi cepat sekali sehingga pengukuran sesaat nilai \vec{S} secara langsung menjadi tidak praktis. Oleh karena itu dihitung \vec{S} secara rata-rata dalam interval waktu yang sesuai

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2c\mu_0} E_0^2$$

yang disebut *rapat fluks radian* mempunyai satuan

W/m^2 yang juga disebut *intensitas* gelombang cahaya I .


TES FORMATIF 1 _____

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Sebuah pengukuran kenaikan temperatur dari plat penyerap yang diatur tegak lurus terhadap sinar matahari yang mengenainya menunjukkan bahwa fluks energi yang disalurkan dari matahari ke permukaan bumi pada terang hari adalah 1 kW/m^2 . Tentukan amplitudo medan listrik E_0 cahaya matahari jika dianggap matahari adalah sumber cahaya monokromatis sebesar
 - A. 910 V/m
 - B. 750 V/m
 - C. 100 V/m
 - D. 900 V/m

- 2) Medan magnet dari sumber cahaya pada soal di atas adalah
 - A. $3,0 \mu\text{T}$
 - B. $4,0 \mu\text{T}$
 - C. $5,0 \mu\text{T}$
 - D. $6,0 \mu\text{T}$

- 3) Cahaya mempunyai cakupan panjang gelombang dari ultraviolet (390 nm) sampai ke merah (780 nm). Laju rambat cahaya dalam ruang hampa adalah $3 \times 10^8 \text{ m/det}$, dan ini adalah laju untuk semua tipe gelombang EM. Tentukan frekuensi yang bersangkutan sebesar
 - A. $f_{\text{merah}} = 7,7 \times 10^{14} \text{ Hz}$ dan $f_{\text{violet}} = 3,9 \times 10^{14} \text{ Hz}$
 - B. $f_{\text{merah}} = 3,8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ dan $f_{\text{violet}} = 7,7 \times 10^{14} \text{ Hz}$
 - C. $f_{\text{merah}} = 7,1 \times 10^{14} \text{ Hz}$ dan $f_{\text{violet}} = 3,1 \times 10^{14} \text{ Hz}$
 - D. $f_{\text{merah}} = 3,1 \times 10^{14} \text{ Hz}$ dan $f_{\text{violet}} = 7,1 \times 10^{14} \text{ Hz}$

- 4) Jika sebuah sumber isotropik ditempatkan di pusat bola maka lumen suatu berkas cahaya yang mengenai luasan $0,3 \text{ m}^2$ pada permukaan bola dengan jari-jari 4 m adalah
- A. 10 lm
 - B. 11 lm
 - C. 14 lm
 - D. 15 lm
- 5) Sebuah sumber cahaya diletakkan di atas pusat meja sejauh 3 m. Jika jari-jari meja adalah 1 m dan intensitas sumber adalah 200 cd, iluminasi di pinggir meja adalah ...
- A. $19,0 \text{ lm/m}^2$
 - B. $19,5 \text{ lm/m}^2$
 - C. $19,7 \text{ lm/m}^2$
 - D. 20 lm/m^2
- 6) Jika bidang normal luasan membentuk sudut 30° terhadap arah sinar datang cahaya maka iluminasi E pada sebuah permukaan kecil berjarak 120 cm dari sumber radiasi titik dengan intensitas 72 cd adalah
- A. 36 lm/m^2
 - B. 40 lm/m^2
 - C. 42 lm/m^2
 - D. 43 lm/m^2
- 7) Sebuah alat pengukur cahaya menunjukkan iluminasi cahaya matahari yang diterima alat adalah 10^5 lm/m^2 . Jika jarak bumi-matahari adalah $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$ maka berapakah intensitas sumber cahaya?
- A. $2,05 \times 10^{27} \text{ cd}$
 - B. $2,25 \times 10^{27} \text{ cd}$
 - C. $2,55 \times 10^{27} \text{ cd}$
 - D. $2,65 \times 10^{27} \text{ cd}$

- 8) Komponen listrik gelombang EM diberikan oleh $E = 10^{-4} \sin(6 \times 10^5 t - 0,01x)$. Frekuensi dari gelombang EM tersebut adalah
- A. 90 kHz
 - B. 91 kHz
 - C. 95,5 kHz
 - D. 101,1 kHz
- 9) Panjang gelombang untuk komponen listrik gelombang EM diberikan oleh $E = 10^{-4} \sin(6 \times 10^5 t - 0,01x)$ adalah
- A. 660 nm
 - B. 670 nm
 - C. 620 nm
 - D. 628 nm
- 10) Bentuk fungsi medan magnet untuk komponen listrik gelombang EM diberikan oleh $E = 10^{-4} \sin(6 \times 10^5 t - 0,01x)$ adalah
- A. $B = 3,3 \times 10^{-13} \sin(6 \times 10^5 t - 0,01x)$ T
 - B. $B = 10^{-14} \sin(6 \times 10^5 t - 0,01x)$ T
 - C. $B = 3,0 \times 10^{-14} \sin(6 \times 10^5 t - 0,01x)$ T
 - D. $B = 10^{-3} \sin(6 \times 10^5 t - 0,01x)$ T

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 1 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 1.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{jumlah soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali
80 - 89% = baik
70 - 79% = cukup
< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan Kegiatan Belajar 2. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 1, terutama bagian yang belum dikuasai.

KEGIATAN BELAJAR 2**Jenis-jenis Radiasi**

Kita mengetahui bahwa jika ada perbedaan temperatur antara dua buah sistem maka akan terjadi transfer energi termal dari sistem yang temperaturnya lebih tinggi ke yang lebih rendah. Proses transfer energi tersebut seperti yang sudah kita ketahui pada pembahasan pada fisika dasar, terjadi melalui tiga proses berbeda: konduksi, konveksi dan radiasi. Dengan konduksi maka transfer panas terjadi di dalam medium bahan. Energi termal dipindahkan dari molekul-molekul yang energi kinetik translasinya lebih tinggi ke molekul sekitar yang memiliki energi kinetik translasi lebih rendah. Transfer ini dapat terjadi dalam bentuk transfer berturut-turut dari molekul satu ke molekul dua, molekul dua ke ketiga, dst. Jadi, transfer panas terjadi tanpa adanya perpindahan massa yang nyata suatu medium. Transfer panas yang terjadi pada logam adalah melalui mekanisme ini. Dengan konveksi, perpindahan panas terjadi dengan menyertakan perpindahan bagian massa medium yang suhunya lebih rendah ke yang lebih tinggi. Ini biasanya terjadi pada molekul-molekul gas dan cairan. Sebagai contoh air yang dipanaskan dengan sumber panas dari api.

Pada Kegiatan Belajar 2 ini akan kita membahas radiasi yang merupakan proses perpindahan panas yang ketiga. Radiasi merupakan proses perpindahan panas dengan bantuan radiasi gelombang EM. Jika sebuah objek dipanaskan, molekul-molekulnya bervibrasi dan akan memancarkan gelombang EM. Gelombang-gelombang ini jika diterima oleh benda yang dalam kondisi suhu yang lebih rendah maka akan menambah energi termal dari molekul-molekul benda dan selanjutnya menaikkan temperaturnya. Untuk proses radiasi ini tidak diperlukan medium antara, seperti pada dua proses perpindahan panas sebelumnya. Gelombang-gelombang EM dalam hal ini dapat merambat di vakum, sebagai contoh pemanasan bumi akibat menerima radiasi sinar matahari yang melalui ruang hampa selama perjalanan ke bumi.

Dari ketiga proses perpindahan panas maka konveksi sering berjalan paling lambat, dengan laju perpindahan panas bergantung gerak medium yang umumnya sekitar 1 m/det. Konduksi terjadi lebih cepat sekitar 10^4 m/det sementara gelombang EM merambat pada laju 3×10^8 m/det, yaitu laju cahaya.

A. RADIASI BENDA HITAM

Seperti sudah kita singgung di atas, radiasi termal adalah sebuah proses dimana sebuah benda pada temperatur tinggi akan kehilangan panas dengan memancarkan energinya melalui gelombang EM. Dari konsep vektor Pointyng sebelumnya kita mengetahui bahwa gelombang EM membawa energi radiasi. Oleh karena itu, jika gelombang-gelombang ini diserap (mengenai) benda maka ia akan menerima energi panas.

Sesungguhnya setiap benda menyerap maupun memancarkan radiasi. Benda yang suhunya lebih tinggi dari sekitarnya akan memancarkan lebih banyak radiasi daripada menyerap dan sebaliknya. Fenomena ini diterangkan oleh *hukum Stefan-Boltzmann*:

“Jumlah radiasi (energi elektromagnetik) yang dipancarkan per satuan waktu dari luasan satuan sebuah benda pada temperatur absolut T Kelvin berbanding langsung dengan pangkat empat suhu T^4 ”

Atau dapat dinyatakan dalam persamaan Stefan-Boltzmann:

$$P = e\sigma T^4$$

P adalah daya yang diradiasikan per satuan luas watt/m² (SI) , σ *tetapan Boltzmann* = $5,67 \times 10^{-8}$ W/m²-K⁴ (SI). Besaran e adalah *emisivitas* yang nilainya bergantung pada sifat permukaan benda dan mempunyai harga antara 0 dan 1, tidak bersatuan.

Jika sebuah benda luas dengan *emisivitas* e suhu T ditempatkan dalam ruangan tertutup dengan dindingnya bersuhu T_0 dengan $T_0 < T$ maka benda akan memancarkan radiasi padan laju daya $P = e\sigma T^4$ sementara menyerap

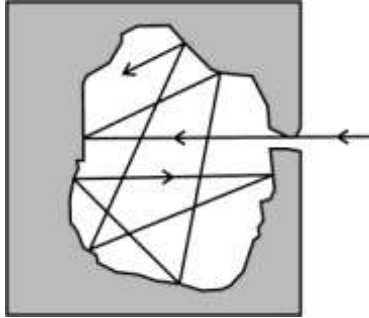
radiasi dari dinding dengan laju $P = e\sigma T_0^4$. Oleh karena itu, laju kehilangan panas oleh proses radiasi adalah:

$$P_{net} = e\sigma T^4 - e\sigma T_0^4 = e\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (1.19)$$

Persamaan (1.19) merupakan bentuk modifikasi (lengkap) dari hukum Stefan-Boltzmann. Jadi jika suhu benda lebih rendah dari sekitarnya akan mendapat tambahan energi dan sebaliknya.

Menurut hukum Kirchoff, sembarang benda yang menyerap radiasi pada gelombang tertentu dengan baik juga akan memancarkan radiasi pada panjang gelombang yang sama dengan baik. Penyerap sempurna adalah pemancar radiasi yang sempurna, penyerap yang kurang baik juga merupakan pemancar yang kurang baik juga. Menurut termodinamika maka *benda hitam (black body)* adalah benda yang menyerap semua radiasi untuk seluruh panjang gelombang. Jika suhu benda lebih rendah dari lingkungan sekitar akan menjadi penyerap sempurna dan sebaliknya. Benda hitam diberi nilai $e = 1$, sedangkan benda selain benda hitam mempunyai $e < 1$.

Perlu dimengerti di sini, benda hitam bukan berarti warnanya hitam (meskipun benda yang berwarna hitam mempunyai sifat-sifat mendekati benda hitam). Kalau kita mempunyai rongga (dari bahan logam misalnya) dengan hanya ada satu lubang kecil sekali dibanding luas pembungkus rongga tersebut maka kita dapat mengatakan juga ini adalah benda hitam. Dapat kita lihat pada Gambar 1.6 bahwa sinar (radiasi) yang masuk ke rongga melalui lubang kecil akan terpantul-pantul di antara bagian-bagian dalam rongga sehingga kemungkinan keluar kecil sekali. Ini memberi gambaran penyerap sempurna pada rongga sebagai benda hitam. Demikian juga jika kita panaskan rongga sampai suhu T maka radiasi yang ke luar dari lobang rongga ternyata membawa seluruh panjang gelombang.



Gambar 1.6
Rongga benda hitam dilihat dari samping

Untuk rongga hitam dengan $e = 1$ maka persamaan Stefan-Boltzmann adalah:

$$P = \sigma T^4 \quad (1.20)$$

$$P_{net} = \sigma(T^4 - T_0^4) \quad (1.21)$$

Contoh Soal 8:

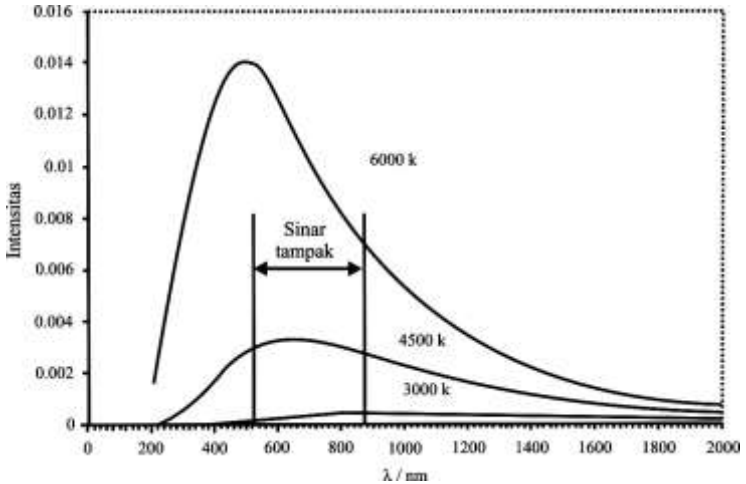
Pada laju berapakah energi teradiasi oleh benda bola berjari-jari 5 cm suhu 3000 °K dengan emisivitas $e = 0,30$?

Penyelesaian:

$P_T = e\sigma T^4$ adalah energi per satuan luas yang dipancarkan dan jika luas luasan adalah A maka total energi radiasi adalah $P_T = PA = e\sigma T^4 A$. Jika $e = 0,3$ dan $T = 3000\text{K}$, $A = 4\pi r^2 = 4\pi(5 \times 10^{-2}\text{m})^2$ maka $P_T = e\sigma T^4 A = (0,3)(5,67 \times 10^{-8})(3000)^4(\pi \times 10^{-2}) = 43,3 \text{ kW}$.

Kita telah membahas bagaimana mendesain rongga benda hitam, yang dapat memancarkan radiasi secara sempurna. Sempurna di sini artinya radiasi yang ke luar lubang jika diamati mengandung semua nilai panjang gelombang/frekuensi. Kita menamakan ini bahwa radiasi terpancar dari benda hitam membentuk *spektrum kontinu*. Jika kita mengatakan $I(f)$ adalah jumlah radiasi terpancar (intensitas) pada frekuensi f , pengukuran secara

eksperimen untuk temperatur yang berbeda-beda menghasilkan kurva distribusi radiasi seperti pada Gambar 1.7 berikut.



Gambar 1.7 Distribusi intensitas pada temperatur yang berbeda untuk radiasi benda hitam

Beberapa karakteristik sederhana dari kurva Gambar 1.7 sebagai berikut:

1. Distribusi $I(f)$ vs f adalah bergantung suhu benda hitam
2. Total jumlah radiasi terpancar yang sama dengan luasan di bawah kurva bertambah sesuai kenaikan suhu benda hitam
3. Puncak maksimum bergeser ke arah frekuensi yang lebih tinggi sejalan dengan kenaikan suhu benda, yaitu: $f_{maks} \propto T$ atau $f_{maks} / T = \text{konstan}$

Selanjutnya nilai konstanta tersebut dapat ditentukan sehingga hukum pergeseran Wien (dengan mengingat $\lambda f = c$) dirumuskan dalam:

$$\lambda_{maks} T = 2,8971 \times 10^6 \tag{1.22}$$

Teori fisika klasik dalam hal ini tidak dapat menerangkan fenomena spektrum radiasi benda hitam. Dalam hal ini Max Planck memberikan gagasan yang brilian untuk model kuantisasi energi gelombang EM, seperti telah kita ulas pada KB1 (konsep foton). Foton adalah kuantum energi

gelombang EM, dengan energi foton $E = hf$. Hipotesa Max Planck untuk kuantisasi energi gelombang EM merupakan titik awal kelahiran fisika kuantum.

Contoh Soal 9:

Sebuah benda hitam berbentuk bola radius 5 cm dipertahankan temperaturnya pada 327°C . Berapa daya yang diradiasikan?

Penyelesaian:

Untuk bola mempunyai luasan $4\pi r^2$ dan suhu absolut adalah ($327+273=600\text{K}$) sehingga:

$$P = e\sigma AT^4 = (1)(5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)[4\pi(5 \times 10^{-2})^2](600)^4 \\ = 231 \text{ W}$$

B. SUMBER-SUMBER RADIASI

Sebarang cahaya (gelombang EM) tentu berasal dari sumber tertentu. Beberapa sumber cahaya adalah matahari, bintang, lampu pijar, lilin, kilat, TV, lampu tabung, laser dan lain-lain. Sumber-sumber radiasi untuk sementara dapat dikelompokkan dalam tiga sumber utama:

1. sumber termal yang menghasilkan spektrum kontinu, seperti benda padat yang menyala (mendekati benda hitam),
2. sumber termal yang menghasilkan spektrum garis dan
3. laser.

Matahari memancarkan radiasi hampir mendekati benda hitam sempurna, dengan λ_m spektrum matahari sekitar 500 nm yang berhubungan dengan temperatur permukaan sekitar $5750 \text{ }^\circ\text{K}$. Setiap cm^2 permukaan bumi menerima sekitar 2 gr kalori dari energi radiasi matahari per menit. Nilai ini sering disebut sebagai *tetapan matahari*. Spektrum matahari memperlihatkan sejumlah banyak garis-garis gelap yang sangat halus yang mana pertama kali di amati oleh Fraunhofer. Fraunhofer mengukur panjang gelombang yang banyak tersebut (disebut garis-garis Fraunhofer) secara hati-hati. Garis-garis gelap Fraunhofer tersebut ditemukan menempati tempat yang sama dalam

spektrum (yaitu mempunyai panjang gelombang yang sama) garis-garis terang emisi spektrum bermacam-macam bahan di laboratorium. Kemudian juga diketahui bahwa bahan dalam wujud gas/uap relatif dingin, jika dilewati sinar akan menyerap gelombang dari sinar tersebut untuk banyak panjang gelombang yang sama seperti jika mereka memancarkan spektrum emisi mereka dieksitasi (misalnya dengan teknik lucutan gas). Kesimpulannya, garis-garis Fraunhofer adalah *garis-garis serapan* dari gas-gas yang cukup dingin diluar atmosfer matahari, ataupun di dalam atmosfer bumi sendiri. Oleh karena itu, secara logis kita dapat menentukan kandungan unsur-unsur yang ada dalam matahari berdasarkan analisis spektrumnya, yaitu dengan membandingkan spektrum yang sesuai dari bahan-bahan yang ada di bumi. Dengan ini, kita yakin lebih dari 60 jenis unsur yang ada dalam bumi kita juga ada dalam atmosfer matahari. Sebenarnya, satu unsur telah dilihat sebagai garis serapan dalam spektrum matahari sebelum garis yang sama dapat diketahui di laboratorium. Unsur tersebut adalah Helium, mengambil nama Helios yang berarti matahari. Beberapa garis-garis Fraunhofer telah dinotasikan berdasarkan huruf, yang mana milik beberapa unsur.

Tabel 1.3 Garis-garis Fraunhofer

Garis Fraunhofer	$\lambda(\mu\text{m})$	Unsur
A	759,38	O
C	656,28	H
D ₂	589,00	Na
G	434,05	H
H	396,85	Ca
B	686,72	O
D ₁	589,59	Na
F	486,13	H
h	410,19	H
K	393,37	Ca

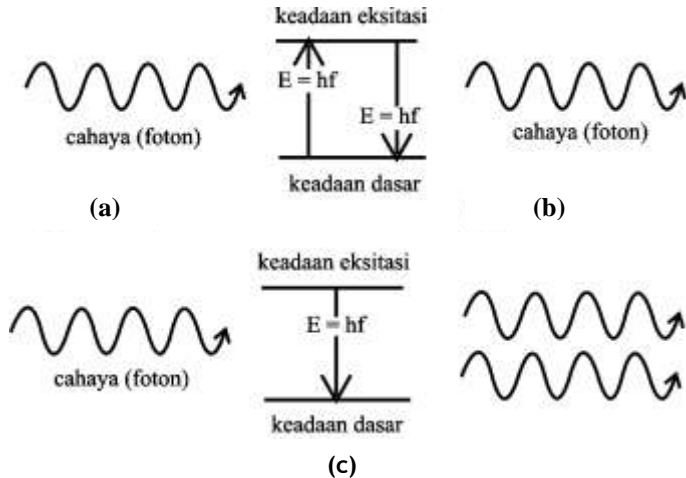
Lampu pijar secara praktis digunakan dikembangkan pertama kali oleh Thomas A. Edison pada 1879. Pada perkembangan selanjutnya filamen lampu menggunakan tungsten. Untuk mengatasi evaporasi filamen akibat dipanaskan maka dalam lampu diisi gas mulia seperti argon atau nitrogen. Keuntungan lampu pijar berbasis filamen tungsten-gas mulia adalah mampu

dioperasikan sampai suhu tinggi (sampai 3400K) namun tidak terlalu cepat kehilangan *lifetime*-nya. Tungsten sendiri mempunyai titik leleh 3665 K. Sumber cahaya lampu lain adalah lampu neon, lampu merkuri, lampu sodium yang bekerja berdasarkan lucutan listrik pada tekanan rendah dan menghasilkan spektrum garis.

Sumber cahaya yang sangat menarik untuk dieksplorasi baik dari segi pemanfaatan (aplikasi) maupun pengembangan (teori) adalah Laser. Cahaya laser memiliki sifat-sifat yang sangat menarik seperti monokromatis dan koheren. Mekanisme pembangkitan Laser sangat memerlukan kajian fisika kuantum. Pada Modul 8 akan kita pelajari mekanisme pembangkitan laser dan sifat-sifat laser lebih detail.

Secara garis besar, sebuah keadaan kuantum molekul dapat mengalami eksitasi akibat menyerap sebuah foton (cahaya) pada frekuensi resonansinya $E=hf$. Proses serapan ini segera diikuti proses emisi cahaya (foton) untuk kembali dari keadaan tereksitasi ke keadaan dasar (*ground state*). Namun demikian di samping dua proses tersebut, keadaan tereksitasi yang sudah ada juga dapat dirangsang untuk memancarkan sebuah foton akibat menyerap sebuah foton yang lain (lihat Gambar 1.8). Hasil emisi terangsang adalah bahwa dua foton emisi adalah sefase (koheren). Jika kita mempunyai banyak atom dalam molekul yang tereksitasi maka sebuah foton tunggal saja dapat menyebabkan hujan foton (emisi terangsang dalam jumlah banyak) yang semuanya sefase.

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) mengeksploitasi sifat ini (emisi terangsang) untuk menghasilkan cahaya yang memiliki sifat: sangat monokromatis (frekuensi mendekati nilai tunggal), koheren, terarah (*collimated*) dan terpolarisasi. Penggunaan laser sangat banyak untuk menopang teknologi modern, seperti untuk sistem baca VCD player, alat bedah kedokteran, dan lain-lain.



(a) Proses Serapan (b) Emisi spontan (c) Emisi terangsang

Pembangkitan laser memerlukan medium aktif (misalnya He/Ne, Ar+, kristal Ruby dll) yang ditempatkan di dalam rongga di antara dua cermin. Medium tersebut lalu dieksitasi dengan berbagai cara yang sesuai (misalnya lucutan listrik, reaksi kimia, dll) untuk menciptakan keadaan *populasi inversi* yaitu keadaan jumlah atom tereksitasi yang berlebih. Dengan adanya populasi inversi maka foton hasil emisi terangsang akan banyak dipancarkan untuk menciptakan berkas laser. Berkas laser yang dihasilkan juga mempunyai daya yang tinggi sehingga kita tidak diperbolehkan menatap langsung berkas laser dari arah depan, karena dapat merusak mata.

C. DETEKTOR RADIASI

Radiasi yang dipancarkan oleh suatu sumber dapat dideteksi dengan berbagai macam cara. Kita melihat cahaya sebenarnya merupakan proses mendeteksi keberadaan cahaya itu sendiri. Beberapa macam detektor cahaya misalnya adalah mata, film negatif kamera, sel surya, *photomultipliers*, CCD dll. Secara umum kita dapat memandang detektor radiasi adalah devais yang menghasilkan sinyal keluaran yang bergantung pada jumlah radiasi yang mengenai daerah aktif detektor. Oleh karena itu mata adalah termasuk

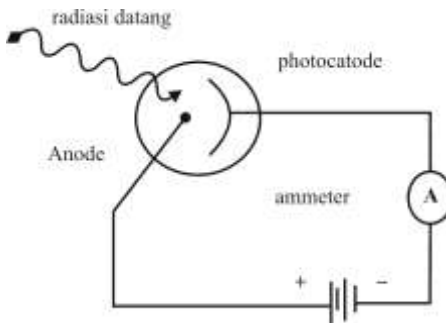
detektor cahaya. Kemudian sering memadai jika kita kelompokkan detektor ke dalam tiga tipe utama:

1. Detektor Termal

Detektor termal mengubah radiasi datang menjadi panas, dengan demikian menyebabkan temperatur beberapa elemen dari detektor naik. Perubahan temperatur ini lalu diubah menjadi sinyal listrik (atau mekanik) yang dapat dikuatkan dan ditampilkan. Detektor termal mempunyai sifat-sifat baik yang disukai seperti sering dapat merespon daerah luas panjang gelombang tanpa ada variasi yang signifikan pada sensitivitas. Detektor ini digunakan manakala daerah spektrum yang luas diperlukan dan kadang-kadang juga digunakan untuk mengkalibrasi detektor lain. Beberapa contoh dari detektor termal untuk menampilkan radiasi optik adalah detektor termokopel, detektor bolometer dan sel Golay.

2. Detektor Foton (*kuantum*)

Detektor foton (*kuantum*) mengesan radiasi datang tanpa ada pemanasan lebih dulu. Proses deteksi berdasarkan adanya serapan foton. Contoh dari detektor foton adalah *photodiode* vacuum, *photomultiplier* dan detektor *photoconductive solid-state*.



Gambar 1.9 Detektor Foton

3. Detektor Koheren

Detektor koheren menghasilkan sinyal keluaran yang merupakan ukuran kuat medan listrik sinyal optik sehingga memberikan informasi fase yang ada pada medan optik. Sebagai contoh detektor koheren adalah *heterodyne receiver*.



LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Gambarkan perpindahan panas radiatif dan hukum matematik yang mengaturnya?
- 2) Apakah yang dimaksud hukum pergeseran Wien?
- 3) Dari pengukuran yang dilakukan di bumi maka diketahui bahwa matahari mempunyai luas permukaan $6,1 \times 10^{18} \text{ m}^2$ dan meradiasikan energi dengan laju $3,9 \times 10^{26} \text{ W}$. Jika diasumsikan emisivitas matahari $e = 1$ hitunglah temperatur permukaan matahari?
- 4) Jelaskan salah satu cara bagaimana Anda menentukan unsur-unsur apa saja yang menyusun atmosfer suatu bintang jauh?
- 5) Jelaskan pengertian cahaya laser bersifat monokromatis?
- 6) Jelaskan mengapa populasi inversi diperlukan dalam pembangkitan (produksi) berkas laser?

Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) Laju P_e di mana energi panas dipancarkan (dalam bentuk gelombang EM) oleh suatu objek dengan luas permukaan A pada temperatur absolut T_e adalah $P_e = \varepsilon \sigma A T_e^4$. Objek yang sama yang ditempatkan dalam suatu ruang tertutup dengan dinding-dindingnya berada pada temperatur absolut T_a akan menyerap radiasi dari dinding tersebut dengan laju serapan $P_a = \varepsilon \sigma A T_a^4$. Jadi, jika sebuah objek lebih panas dari dinding

yang membungkusnya ($T_e > T_a$) maka akan ada aliran total energi dari objek ke dinding dengan laju:

$P = P_e - P_a = \varepsilon\sigma A(T_e^4 - T_a^4)$. Persamaan matematik yang mengatur perpindahan panas radiatif adalah hukum Stefan-Boltzmann tersebut.

- 2) Hukum pergeseran Wien menyatakan bahwa temperatur absolut benda hitam dan panjang gelombang puncak radiasinya berbanding secara terbalik melalui persamaan Wien $\lambda_{maks}T = 2898\mu m \cdot ^\circ K$. Dengan panjang gelombang puncak maksudnya bahwa energi lebih banyak diradiasikan dalam interval panjang gelombang $\lambda \pm \frac{1}{2}\Delta\lambda$ daripada dalam interval lain.
- 3) Dengan menggunakan hukum Stefan-Boltzmann $P_e = \varepsilon\sigma AT_e^4$ maka dapat kita hitung berdasarkan data-data yang ada bahwa suhu permukaan matahari adalah $T_e = 5800$ K.
- 4) Kita dapat memperkirakan unsur-unsur pembentuk lapisan atmosfir suatu bintang dengan mengamati spektrum serapan radiasi yang diterima di bumi dari bintang tersebut. Dengan membandingkan spektrum serapan dengan spektrum yang dikenali di bumi untuk unsur-unsur yang sudah diketahui maka kita dapat menebak unsur apa yang ada di bintang tersebut.
- 5) Cahaya laser bersifat monokromatis artinya spektrum cahaya yang dihasilkan mempunyai daerah frekuensi yang sangat sempit sehingga dapat dikatakan satu frekuensi tunggal. Sebagai perbandingan, cahaya dari lampu pijar memancarkan spektrum panjang gelombang (frekuensi) yang luas.
- 6) Populasi inversi diperlukan karena agar memungkinkan terjadinya emisi terangsang dalam jumlah besar sehingga kita dapat memperoleh berkas laser yang koheren.



RANGKUMAN

Transfer energi termal terjadi dari sistem yang temperaturnya lebih tinggi ke yang lebih rendah. Proses transfer energi tersebut seperti yang sudah kita ketahui pada kuliah fisika dasar, terjadi melalui tiga proses berbeda: konduksi, konveksi dan radiasi. Radiasi merupakan proses perpindahan panas dengan bantuan radiasi gelombang EM. Sesungguhnya setiap benda menyerap maupun memancarkan radiasi. Benda yang suhunya lebih tinggi dari sekitarnya akan memancarkan lebih banyak radiasi daripada menyerap dan sebaliknya. Fenomena ini diterangkan oleh *hukum Stefan-Boltzmann* $P = e\sigma T^4$. Selanjutnya nilai konstanta tersebut dapat ditentukan sehingga hukum pergeseran Wien $\lambda_{maks} T = 2,8971 \times 10^6$.

Sebarang cahaya (gelombang EM) berasal dari sumber tertentu. Beberapa sumber cahaya adalah matahari, bintang, lampu pijar, lilin, kilat, TV, lampu tabung, lasers dll. Sumber-sumber radiasi untuk sementara dapat dikelompokkan dalam tiga sumber utama: (1) sumber termal yang menghasilkan spektrum kontinu seperti benda padat yang menyala (mendekati benda hitam), (2) sumber termal yang menghasilkan spektrum garis dan (3) laser.

Radiasi yang dipancarkan oleh suatu sumber dapat dideteksi dengan berbagai macam detektor. Dapat kita kelompokkan detektor-detektor: (1) detektor termal, (2) detektor foton dan (3) detektor koheren.



TES FORMATIF 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Suhu permukaan matahari kira-kira 6000K. Radiasi matahari maksimum dipancarkan pada panjang gelombang 0,5 μm . Sebuah filamen lampu pijar tertentu memancarkan radiasi maksimum pada 2 μm . Jika keduanya permukaan matahari dan filamen mempunyai karakteristik emisivitas yang sama, kira-kira berapa suhu filamen lampu pijar tersebut
 - A. 1200 K
 - B. 1300 K
 - C. 1400 K
 - D. 1500 K

- 2) Jika $\Delta T = T_e - T_a$ adalah perbedaan suhu antara objek (T_e) dan dinding kontainer yang mengungkung objek (T_a). Kemudian $\Delta T \ll T_a$ maka laju netto perpindahan panas dari objek ke dinding dapat kita nyatakan dengan
- A. $P = 2\varepsilon\sigma T_a^3 \Delta T$
 - B. $P = 4\varepsilon\sigma T_a^3 \Delta T$
 - C. $P = 2\varepsilon\sigma T_a^2 \Delta T^2$
 - D. $P = 4\varepsilon\sigma T_a^2 \Delta T^2$
- 3) Sebuah benda hitam pada temperatur 527°C akan meradiasi dua kali energi tiap detik. Berapakah temperatur yang harus dinaikkan supaya terpenuhi kondisi tersebut
- A. 951 K
 - B. 961 K
 - C. 971 K
 - D. 981 K
- 4) Sebuah radiator rumah tangga mempunyai emisivitas permukaan 0,55 dan luas permukaan $1,5 \text{ m}^2$. Jika suhu radiator adalah 50°C dan suhu dinding ruang rumah adalah 22°C maka berapa laju netto radiasi yang dialami oleh radiator
- A. 125 W
 - B. 135 W
 - C. 155 W
 - D. 160 W
- 5) Termasuk sumber radiasi yang memperlihatkan spektrum kontinu adalah
- A. matahari
 - B. lampu merkuri
 - C. lampu Neon
 - D. laser

- 6) Sumber radiasi yang menghasilkan spektrum *diskrit* adalah
- A. laser
 - B. lampu Neon
 - C. benda hitam
 - D. jawaban A dan B benar
- 7) Sebuah detektor radiasi menghasilkan sinyal listrik keluaran yang bergantung pada perubahan temperatur dari elemen aktif. Maka detektor ini termasuk jenis
- A. Detektor listrik
 - B. Detektor termal
 - C. Detektor Foton
 - D. Detektor temperatur
- 8) Salah satu aplikasi dari hukum Stefan-Boltzmann adalah untuk mendesain
- A. sistem perpindahan panas pada reaktor
 - B. inkubator bayi prematur
 - C. pemanas Air
 - D. pendingin air
- 9) Contoh bagian yang termasuk dari spektrum cahaya tampak adalah
- A. sinar hijau
 - B. gelombang radio
 - C. sinar merah
 - D. sinar hijau dan sinar merah
- 10) Contoh bagian yang termasuk gelombang Elektromagnetik adalah
- A. cahaya tampak
 - B. gelombang mikro dan radio
 - C. sinar Gamma
 - D. semua jawaban benar

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 2 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 2.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{jumlah soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali

80 - 89% = baik

70 - 79% = cukup

< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan modul selanjutnya. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 2, terutama bagian yang belum dikuasai.

Kunci Jawaban Tes Formatif

Tes Formatif 1

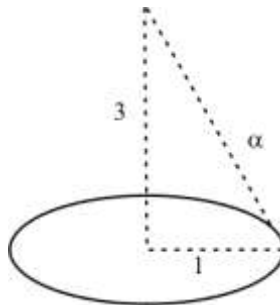
- 1) D 900 V/m Dengan menggunakan rumusan:

$$E_0 = \sqrt{2\mu_0 c \langle S \rangle} =$$

$$\sqrt{2(4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m})(3 \times 10^8 \text{ m/det})(1 \times 10^3 \text{ W/m}^2)}$$

$$= 900 \text{ V/m}$$

- 2) A 3,0 μT . Ini dapat dihitung dari kaitan $B_0 = E_0/c$
- 3) C $f_{\text{merah}} = 3,8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ dan $f_{\text{violet}} = 7,7 \times 10^{14} \text{ Hz}$. Digunakan rumus $c = \lambda f$.
- 4) D 15 lm. Luas permukaan bola tegak lurus arah datang sinar sehingga $E = I/r^2 = (800 \text{ cd})/(4,0 \text{ m})^2 = 50 \text{ lm/m}^2$. Fluks cahaya yang melalui luasan adalah $F = EA = (50)(0,3) = 15 \text{ lm}$
- 5) A 19 lm/m^2 . Dapat dihitung dari $E = (I/r^2)\cos\alpha$ dengan $r = (3^2 + 1^2)^{1/2} = 3,16 \text{ m}$ dan $\cos\alpha = (3 \text{ m})/(3,16 \text{ m}) = 0,949$. Jadi $E = (200 \text{ cd}/10 \text{ m}^2)(0,949) = 19,0 \text{ lm/m}^2$.



- 6) D 43 lm/m^2 . $E = E_{\text{maks}}\cos\alpha = (I/r^2)\cos\alpha = (72 \text{ lm}/(1,2 \text{ m})^2)\cos 30^\circ = 43 \text{ lm/m}^2$.
- 7) B $2,25 \times 10^{27} \text{ cd}$. Gunakan rumus $I = Er^2$.
- 8) C Jika kita ingat bentuk dasar fungsi gelombang $E = E_0 \sin[2\pi f - (2\pi x/\lambda)]$ dan membandingkan dengan fungsi dalam soal maka maka frekuensi gelombang adalah 95,5 kHz.
- 9) D 628 nm
- 10) A $B = E/c = 3,3 \times 10^{-13} \sin(6 \times 10^5 t - 0,01x) \text{ T}$

Tes Formatif 2

1) D 1500 K. Kita gunakan hukum Wien: $2T_{\text{fil}} = (0,5)(6000) \rightarrow T_{\text{fil}} = 1500\text{K}$

2) B $P = 4\varepsilon\sigma T_a^3 \Delta T$. Laju netto perpindahan dinyatakan dengan hukum Stefan-Boltzman termodifikasi yaitu $P_e - P_a = \varepsilon\sigma A(T_e^4 - T_a^4)$. Jika $T_e = T_a + \Delta T$ maka kita mempunyai:

$$\begin{aligned} T_e^4 - T_a^4 &= (T_a + \Delta T)^4 - T_a^4 = \\ &= (T_a^4 + 4T_a^3\Delta T + 6T_a^2\Delta T^2 \\ &\quad + 4T_a\Delta T^3 + \Delta T^4) - T_a^4 \\ &= 4T_a^3\Delta T \left[1 + \frac{6}{4}\frac{\Delta T}{T_a} + \left(\frac{\Delta T}{T_a}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{\Delta T}{T_a}\right)^3 \right] \end{aligned}$$

Jika $\Delta T \ll T_a$ maka tiga suku terakhir dalam kurung siku dapat diabaikan sehingga $P = P_e - P_a = 4\varepsilon\sigma T_a^3 \Delta T$

3) A 951 K. Menurut Stefan-Boltzmann maka $P \propto T^4$. Jadi berlaku persamaan $\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1^4}{T_2^4}$ sehingga

$$T_2^4 = \frac{T_1^4 P_2}{P_1} \rightarrow T_2 = \sqrt[4]{\frac{T_1^4 P_2}{P_1}} = \left(\frac{T_1^4 P_2}{P_1}\right)^{1/4} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1/4} (T_1). \quad \text{Dari}$$

soal maka kita hitung T yang perlu ditambahkan adalah $T = 2^{1/4}(527+273=800)=951\text{ K}$.

4) C 155 W.

Dapat kita hitung bahwa

$$P = P_e - P_a = \varepsilon\sigma A(T_e^4 - T_a^4) = 509\text{W} - 354\text{W} = 155\text{W}.$$

5) A Matahari. Matahari dapat dianggap sebagai benda hitam. Sifat benda hitam memberikan spektrum seluruh panjang gelombang (kontinu). Spektrum garis matahari yang teramati akibat serapan

panjang gelombang oleh atmosfer dekat matahari.

6) C Jawaban A dan B benar. Laser mengeluarkan satu panjang

gelombang (monokromatis) sehingga ini dapat dianggap diskrit (garis) secara khusus. Lampu neon menghasilkan spektrum garis (diskrit) juga.

- 7) B Detektor termal
- 8) B Desain inkubator bayi dapat memanfaatkan hukum ini.
- 9) D Sinar hijau dan sinar merah
- 10) D Semua jawaban benar

Glosarium

- Foton : Einstein (1905) yang mengajukan gagasan bahwa energi yang dibawa oleh berkas cahaya yang dalam bentuk medan listrik-magnet dari gelombang EM, sebenarnya dikonsentrasikan dalam bentuk paket kecil yang disebut *foton*. Cahaya dianggap sebagai aliran butiran yang kita sebut foton. Energi foton sebanding dengan frekuensinya menurut rumus $E = hf$.
- Dualisme gelombang-materi : Sebuah entitas pada suatu saat dapat ditelaah menurut aspek gelombangnya, dan pada saat yang lain lebih cocok jika ditelaah menurut aspek partikelnya. Kedua hal ini disatukan dalam persamaan yang terkenal
- $$\lambda = \frac{h}{p}$$
- Radiometri : Hal ihwal tentang bagaimana mengukur energi yang terkandung dalam medan radiasi optik juga menentukan bagaimana energi ini mengalir melalui sistem optik.
- Optika fisis : Telaah fenomena cahaya berdasarkan sifat-sifat gelombang dan oleh karena itu optika fisis sering disebut dengan *optika gelombang*. Pendekatan ini bekerja dengan baik jika perubahan-perubahan energi dapat diabaikan. Dengan model ini kita dapat menggambarkan dengan baik gejala difaksi, interferensi dan polarisasi.
- Optika geometris : Pendekatan fenomena cahaya jika panjang gelombang cahaya sangat kecil dibandingkan dengan obyek yang sedang dalam peninjauan. Dengan ini kita menganggap cahaya sebagai sinar yang merambat dalam lintasan lurus. Pendekatan ini cukup akurat untuk kajian lensa dan teleskop.
- Optika : Pendekatan telaah optik dengan meninjau interaksi

- kuantum : antara cahaya dengan materi dan ada perubahan energi yang signifikan, di mana memerlukan perkawinan dengan bidang mekanika kuantum.
- Radiasi : Istilah umum untuk *proses* di mana energi radiasi dibangkitkan. Sebagai contoh khusus, energi termal suatu padatan yang diubah menjadi energi radiasi maka proses tersebut disebut *radiasi termal*.
- Fotometri : Berkenaan dengan pengukuran radiasi optik sebagaimana yang dikesan oleh mata (retina) manusia terhadap radiasi datang.
- Hukum Stefan Boltzmann : “Jumlah radiasi (energi elektromagnetik) yang dipancarkan per satuan waktu dari luasan satuan sebuah benda pada temperatur absolut T Kelvin berbanding langsung dengan pangkat empat suhu T ”
atau
$$P = e\sigma T^4$$
- Benda Hitam : Benda yang mempunyai sifat memancarkan radiasi atau menyerap radiasi secara sempurna.. Jika suhu benda lebih rendah dari sekitar akan menjadi penyerap sempurna dan sebaliknya. Benda hitam diberi nilai $e = 1$, sedangkan benda selain benda hitam mempunyai $e < 1$.
- LASER : Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) mengeksploitasi sifat (emisi terangsang) untuk menghasilkan cahaya yang memiliki sifat: sangat monokromatis (frekuensi mendekati nilai tunggal), koheren, terarah (*collimated*) dan terpolarisasi.
- Populasi inversi : yaitu keadaan jumlah atom (populasi) keadaan tereksitasi yang berlebih. Dengan adanya populasi inversi maka foton hasil emisi terangsang akan banyak dipancarkan untuk menciptakan berkas laser. Keadaan populasi *inverse* diperlukan agar terjadi LASER.
- Detektor termal : Detektor ini mengubah radiasi datang menjadi panas, dengan demikian menyebabkan temperatur beberapa

elemen dari detektor naik. Perubahan temperatur ini lalu diubah menjadi sinyal listrik (atau mekanik) yang dapat dikuatkan dan ditampilkan. Detektor termal mempunyai sifat-sifat baik yang disukai seperti sering dapat merespons daerah luas panjang gelombang tanpa ada variasi yang signifikan pada sensitivitas. Detektor ini digunakan manakala daerah spektrum yang luas diperlukan dan kadang-kadang juga digunakan untuk mengkalibrasi detektor lain. Beberapa contoh dari detektor termal untuk mengesan radiasi optik adalah detektor termokopel, detektor bolometer dan sel Golay.

Detektor foton : Detektor ini mengesan radiasi datang tanpa ada pemanasan lebih dulu. Proses deteksi berdasarkan adanya serapan foton. Contoh dari detektor foton adalah *photodiode vacuum*, *photomultiplier* dan detektor *photoconductive solid-state*.

Detektor koheren : Detektor ini menghasilkan sinyal keluaran yang merupakan ukuran kuat medan listrik sinyal optik sehingga memberikan informasi fase yang ada pada medan optik. Sebagai contoh detektor koheren adalah *heterodyne receiver*.

Daftar Pustaka

- Arya, A.P. (1979). *Introductory College Physics*. Macmilan Publishing Co. Inc
- Beynon, J. (1988). *Work out Waves and Optics*. Macmillan Education LTD.
- Boyd, R.W. (1983). *Radiometry and The Detection of Optical Radiation*, John Wiley & Sons.
- Guenther, R. (1990). *Modern Optics*. John Wiley & Sons.
- Halpern, A. (1988). *Physics: Schaum's Solved Problems Series*. McGraw-Hill Book Company,
- Pedrotti, aAF.L, Pedrotti, L.S. (1993). *Introduction to Optics*. Prentice Hall, Inc.
- Ryer, A. (1998). *Light Measurement Handbook*. International Light Inc.
- Sears, F.W. (1949). *Optic*. Addison-Wesley Publishing Company, Japan.
- Welford, W.T. (1988). *Optic*. Oxford Science Publishing.