
3.1 Pengantar

Dalam bahagian Bab III ini, kita akan kaji peranan benda-benda mikro dari peristiwa-peristiwa yang ada di alam semesta. Pembahasan akan diawali dengan penjelasan tentang konsep cahaya, yang dianggap sebagai sesuatu yang misteri. Teori klasik mengatakan cahaya sebagai gelombang yang didukung oleh beberapa hasil eksperimen, sementara teori moderen (kuantum) mengatakan cahaya dapat berperilaku sebagai partikel, yang juga didukung oleh beberapa hasil eksperimen. Kedua teori tersebut secara mendetail akan dijelaskan dalam Bab III ini.

3.2 Kegagalan Teori Gelombang Cahaya

Semenjak abad ke-16 sampai dengan sekarang ini konsep tentang cahaya masih menjadi sesuatu yang misteri. Dua konsep penting dan saling bertentangan telah dikemukakan tentang pengertian cahaya. Pertama dikemukakan oleh Newton (1643-1727), yang mengatakan bahwa cahaya terdiri (tersusun) atas partikel individu yang dipancarkan oleh sumber cahaya dan merambat dalam ruang berbentuk garis lurus. Sebaliknya oleh Huggens (1629-1695) mengatakan bahwa cahaya berbentuk gelombang, seperti halnya gelombang air yang permulaannya berbentuk lingkaran. Dari dua konsep yang berbeda ini, sepanjang sejarah fisika terjadi perselisihan yang agak serius diantara fisikawan. Tetapi hal yang mengherankan kedua konsep tersebut, menurut pengetahuan kita sekarang ini, adalah benar dan dapat didefinisi dengan baik secara fisis dan matematis.

Setelah abad ke-16, orang mulai meninggalkan konsep "Cahaya Sebagai Partikel" yang dikemukakan oleh Newton, para ilmuwan mulai meyakini ide yang dikemukakan oleh Huggens. Hal ini disebabkan banyak eksperimen (seperti peristiwa difraksi, refleksi, interferensii, dst) dapat ditunjukkan oleh cahaya. Secara teoritis, Maxwell (1813-1879) berhasil merumuskan persamaan gelombang cahaya yang merambat dalam ruang vakum. Ini merupakan suatu-suatunya teori yang memperkuat konsep cahaya sebagai gelombang dan Maxwell berhasil mengkategorikan cahaya sebagai gelombang elektromagnetik. Berikut kita akan bahas secara singkat bagaimana Maxwell merumuskan persamaan gelombang untuk cahaya tersebut.

Persamaan-persamaan dasar Maxwell tentang gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa ditulis dalam bentuk:

$$\nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = \rho \quad [\text{coulomb/m}^2] \quad (3.1a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad [\text{weber/m}^2] \quad (3.1b)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad [\text{volt/m}^2] \quad (3.1c)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \mathbf{B} = \mathbf{J} + \frac{\partial(\epsilon \mathbf{E})}{\partial t} \quad [\text{amper/m}^2] \quad (3.1d)$$

Di mana ρ dan \mathbf{J} adalah rapat muatan listrik (coulomb/m²) dan rapat arus listrik (ampere/m²). Kita dapat hitung parameter \mathbf{B} dalam persamaan (3.1c) dengan melakukan operasi Curl pada komponen \mathbf{E} dan \mathbf{B} di kedua sisi persamaan (3.1c).

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) \quad (3.1e)$$

Kemudian kita samakan persamaan (3.1d) dengan (3.1c), sehingga didapat.

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) + \mu_o \epsilon_o \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = -\mu_o \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t}$$

Parameter $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E})$ dapat disederhanakan dengan pengambilan identitas vektor

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla \cdot (\nabla \cdot \mathbf{E}) - (\nabla^2 \cdot \mathbf{E})$$

Bila medan \mathbf{E} tidak divergen, maka $\nabla \cdot \mathbf{E} = \mathbf{0}$, sehingga didapat hubungan dalam bentuk

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -(\nabla^2 \cdot \mathbf{E}) \quad (3.1f)$$

Dengan demikian bentuk di atas dapat ditulis menjadi,

$$\nabla^2 \cdot \mathbf{E} - \mu_o \epsilon_o \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.2)$$

Ini merupakan bentuk persamaan gelombang cahaya atau bentuk umum persamaan gelombang elektromagnetik dalam ruang tiga dimensi. Gelombang cahaya tersebut merambat dalam ruang hampa atau dalam ruang yang bebas dari sumber muatan dan sumber arus ($\mu_0 \epsilon_0$). Persamaan 3.2 dapat diselesaikan dengan memilih solusi coba-coba

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \sin(kz - \omega t) \quad (3.2a)$$

Di mana k adalah bilangan gelombang yang besarnya $k = 2\pi/\lambda$, sedangkan ω adalah frekuensi angular. Persamaan (3.20) dan (3.2a) dapat juga diturunkan untuk parameter \mathbf{B} . Selanjutnya laju intensitas (daya) P dapat ditentukan dari definisi "vektor poyting" \mathbf{S} , yaitu:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \quad (3.2b)$$

Dan definisi daya dalam arah z

$$P = \mathbf{S} \cdot \mathbf{A} \quad (3.2c)$$

Dengan memanfaatkan dua definisi tersebut, kita dapatkan intensitas gelombang cahaya ditulis dalam bentuk

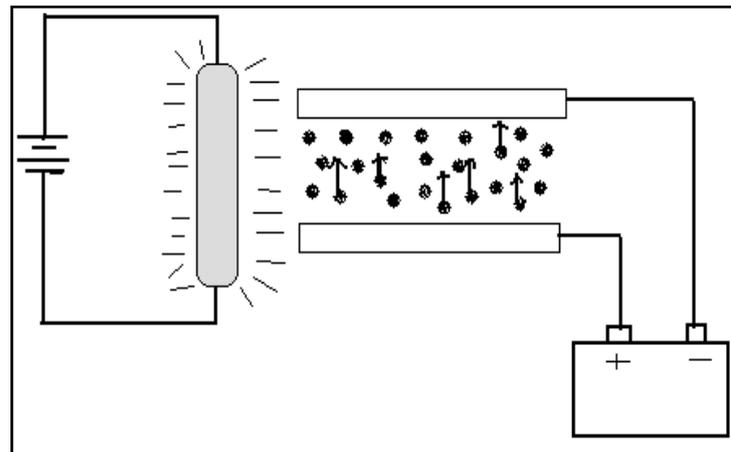
$$P = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} E_0^2 A \sin^2(kz - \omega t) \quad (3.3)$$

Dalam pembahagian yang akan datang, kita akan kemukakan percobaan yang hasilnya bertentangan dengan persamaan (3.2) dan (3.3). Hal yang menarik dari persamaan (3.3) adalah intensitas berbanding lurus dengan kuadrat amplitudo gelombang E_0^2 dan berfluktuasi terhadap waktu frekuensi angular $\omega = 2\pi f$.

Berikut akan kita tunjukkan sesuatu eksperimen, dimana hasil eksperimen tersebut tidak dapat dijelaskan oleh cahaya, bila dianggap gelombang. Bila benda yang dikenai cahaya ukurannya jauh lebih besar dari panjang gelombangnya, maka efek pembiasan dan pemantulan yang lebih menonjol. Sebaliknya bila ukuran benda tersebut mendekati panjang gelombang, maka yang lebih menonjol adalah efek difraksi dan interferensii. Selanjutnya bila ukuran benda sama dengan panjang gelombang cahaya, maka saat cahaya mengenai benda (dalam hal ini sama dengan ukuran atom), maka ia akan diserap dalam bentuk energi radiasi. Kemudian elektron dalam atom akan memanfaatkan energi tersebut untuk membebaskan diri

dari ikatan pola atom. Bila elektron berhasil melepaskan diri dari ikatan dengan atom, maka atom tersebut berubah menjadi ion positif atau atom tersebut terionisasi.

Dalam percobaan berikut, sumber cahaya kita gunakan lampu Neon berwarna "ultraviolet", sementara "benda" yang akan "ditumbuk" oleh gelombang elektromagnetik u-v adalah tetesan minyak seperti dalam gambar (3.1)

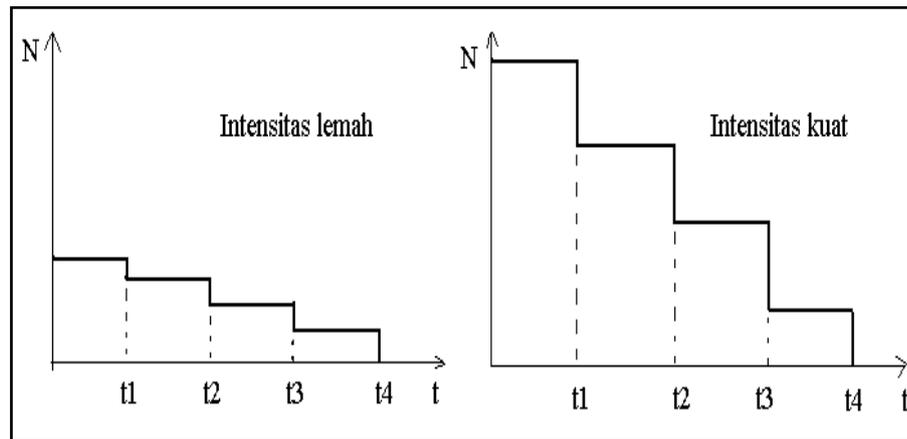


Gambar 3.1 Ilustrasi percobaan tetesan minyak Andrew Millikan
(Sumber: Sutrisno, 2003; 34)

Sebelum percobaan kita laksanakan, kita membuat dulu dugaan berdasarkan persamaan (3.2) dan (3.3). Parameter yang bergetar dalam gelombang cahaya menurut kedua persamaan tersebut adalah medan listrik E . Selanjutnya, dari persamaan (3.3) dapat juga dilihat bahwa intensitas cahaya berbanding lurus dengan kuadrat medan E , ini artinya bila intensitas lemah, maka medan E juga lemah. Dengan kata lain bila intensitas cahaya lemah, maka efek getaran medan E terhadap elektron dalam atom juga lemah, sehingga untuk melepaskan elektron dalam atom memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan cahaya yang intensitasnya lebih besar. Ini dugaan yang kita buat !!

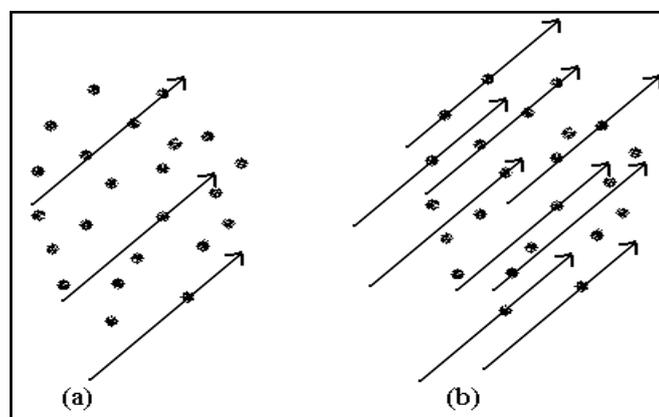
Hasil percobaan menunjukkan atom-atom yang terionisasi terjadi setelah cahaya u-v disinari, baik intensitasnya lemah atau kuat, itu tidak ada beda. Yang membedakan antara kedua intensitas tersebut adalah "jumlah" atom yang terionisasi. Untuk intensitas lemah didapati jumlah atom yang terionisasi sedikit, sementara untuk intensitas kuat didapati jumlah ion yang lebih banyak, tapi keduanya terjadi dalam selang waktu yang sama. Hasilnya ditunjukkan dalam gambar 3.2. Berdasarkan diagram dalam gambar 3.2 tampak bahwa terjadi

ionisasi oleh cahaya lemah sama dengan selang waktu yang terjadi oleh cahaya kuat. Bedanya hanya pada jumlah atom yang terionisasi.



Gambar 3.2 Perbandingan jumlah ion positif terhadap selang waktu pada intensitas lemah dan kuat
(Sumber: Sutrisno, 2003; 35)

Bila dilihat dari hasil di atas, maka definisi intensitas yang diberikan oleh persamaan (3.3) kurang tepat. Seolah-olah definisi intensitas berbanding lurus dengan jumlah "sesuatu", artinya bila intensitas lemah, maka "sesuatu" itu jumlahnya sedikit, sementara untuk intensitas kuat jumlahnya banyak. Sesuatu itu sekarang ini kita kenal dengan istilah "foton" atau partikel cahaya. Perbandingan intensitas kuat atau lemah untuk definisi cahaya kita sekarang ditunjukkan oleh gambar 3.3



Gambar 3.3 Model cahaya intensitas lemah (a) dan intensitas kuat (b)
(Sumber: Sutrisno, 2003;37)

Akhirnya dapat dikatakan, pada saat cahaya bertumbukan dengan benda berukuran mikro (seperti atom), maka ia berperilaku sebagai partikel yang dikenal dengan foton. Sementara saat cahaya bertumbukan dengan benda berukuran makro (seperti cermin atau air), maka cahaya berperilaku sebagai gelombang. Dalam bahagian selanjutnya kita akan pelajari beberapa percobaan yang memerlukan definisi cahaya sebagai kumpulan partikel.

3.3 Radiasi Benda Hitam

Dalam pembahasan Radiasi Benda Hitam, kita akan bedakan dalam dua sub-bagian. Pertama, menyangkut dengan Radiasi thermol dari suatu benda, sementara yang kedua menyangkut dengan Radiasi Benda Hitam sempurna.

3.3.1 Radiasi Thermal

Pada percobaan tetesan minyak di atas, telah didapat informasi bahwa muka gelombang cahaya harus dipandang sebagai sesuatu yang diskrit, yang dikenal dengan "foton" atau "partikel" cahaya. Sekarang kita akan lihat bagaimana perilaku gelombang **EM** atau cahaya yang dipancarkan oleh suatu benda pada temperatur tertentu yang dikatakan dengan "**Radiasi Thermal**".

Semua benda memancarkan radiasi seperti itu ke sekelilingnya dan sekaligus menyerap juga darinya. Bila temperatur benda lebih tinggi dari temperatur lingkungannya, maka ia akan menjadi dingin, hal itu disebabkan daya pancar radiasi lebih besar dari penyerapan Radiasi Thermal. Ketika kondisi seimbang tercapai, maka laju pemancaran dan penyerapan radiasi menjadi sama.

Benda-benda padat (seperti zat padat dan liquid) memancarkan radiasi thermol dalam bentuk kontinyu, tidak tergantung dari material penyusun benda, dan hanya tergantung secara kuat pada temperatur. Pada temperatur kamar, benda-benda yang tampak kita lihat bukanlah karena memancarkan radiasi thermalnya, tetapi karena cahaya yang dipantulkan oleh benda tersebut dari sumber lain. Jika tidak ada cahaya yang menyinari, maka kita tidak akan dapat melihatnya. Bila temperatur benda dinaikkan, maka benda kelihatan merah, kuning, terus

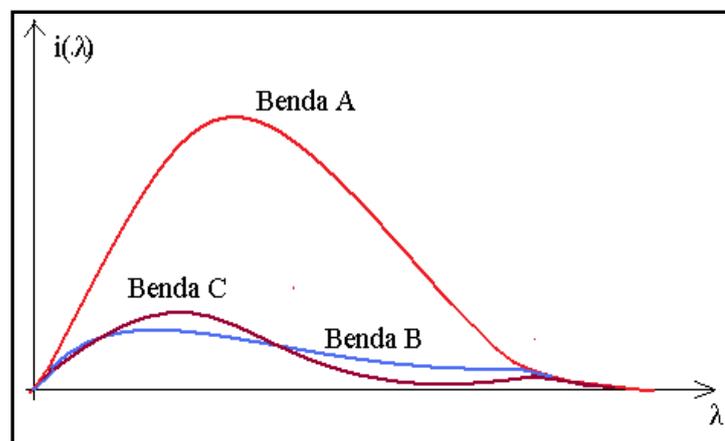
sampai ke warna violet sesuai dengan kenaikan temperatur. Besar intensitas persatuan luar permukaan benda disebut dengan ”**Daya Emisi monokromatik**” dan dinyatakan dengan $i(\lambda)$. Intensitas cahaya yang dipancarkan oleh satuan luas benda untuk daerah panjang gelombang $d\lambda$ disekitar λ adalah

$$dI = i(\lambda)d\lambda \quad (3.4)$$

dengan demikian intensitas total merupakan intergral keseluruhan luas di bawah kurva dari $i(\lambda)$, yaitu:

$$I = \int_0^{\infty} i(\lambda)d\lambda \quad (3.4a)$$

Kurva yang ingin diintegral ditunjukkan dalam gambar 3.4



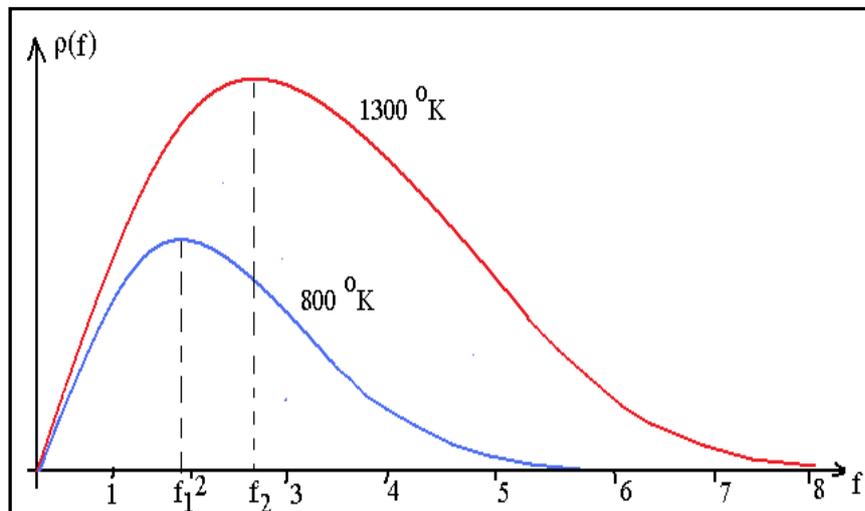
Gambar 3.4 Daya emisi monokromatik untuk benda hitam sempurna (A) dan benda biasa (B,C) (Sumber: Krane, 2001;23)

Persamaan (3.4a) terjadi juga untuk kasus sebaliknya, yaitu penyerapan radiasi termal dari sekitarnya. Distribusi daya emisi benda A dalam gambar 3.4 diatas jauh lebih sempurna daripada benda B dan benda C. Ini dapat dikatakan bahwa benda A memiliki daya pancar dan daya serap yang sempurna. Jenis pancaran dan penyerapan seperti ini biasanya datang dari benda ”**hitam sempurna**”.

3.3.2 Radiasi Benda Hitam Sempurna

Untuk memahami konsep benda hitam sempurna, kita perhatikan uraian berikut. Bayangkan sebuah kotak yang dindingnya berada pada temperatur tertentu. Atom-atom penyusun dinding sedang memancarkan radiasi elektromagnetik dan dalam waktu bersamaan atom-atom tersebut juga menyerap radiasi yang dipancarkan oleh atom-atom yang lain. Akibatnya medan radiasi Elektromagnetik (EM) memenuhi seluruh ruangan tersebut. Ketika radiasi yang terjatoh dalam kotak tersebut mencapai keseimbangan dengan atom-atom dinding, maka jumlah energi yang dipancarkan oleh atom sama dengan jumlah energi yang diserap olehnya. Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Lummer dan Pringthein pada tahun 1899 menunjukkan bahwa pada kondisi setimbang, radiasi Elektromagnetik yang terjatoh memiliki distribusi energi yang terdefinisi dengan baik. Maksudnya untuk masing-masing frekuensi terdapat suatu rapat energi yang hanya tergantung pada temperatur dinding.

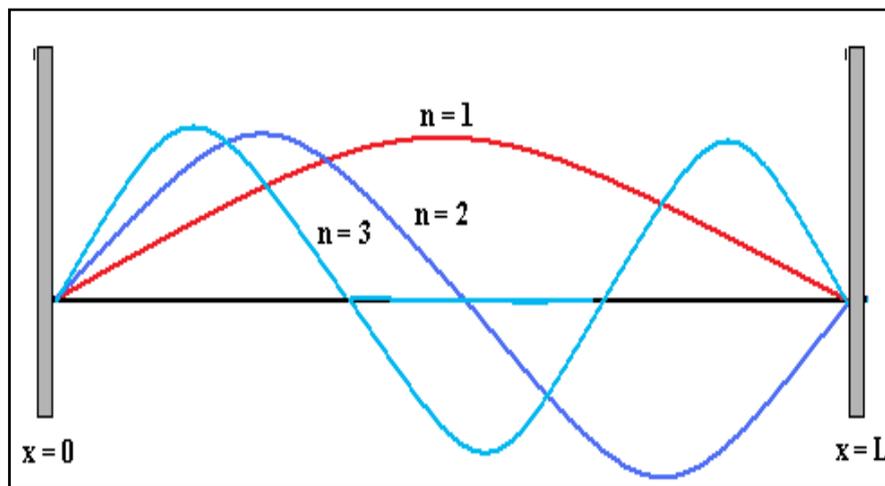
Bila sekarang pada salah satu sisi kotak tersebut terdapat suatu lubang kecil, maka beberapa radiasi Elektromagnetik akan keluar dan efeknya ada kemungkinan untuk dianalisa. Lubang tersebut akan kelihatan sangat terang ketika benda berada pada temperatur tinggi dan intensitas radiasi sangat rendah. Karena proses penyerapan dan pemancaran radiasi dari lubang tersebut secara sempurna, maka lubang tersebut dikatakan dengan model "benda hitam sempurna".



Gambar 3.5 Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Lummer dan Prinsler (1899). Kaitan rapat energi terhadap frekuensi radiasi EM (Sumber: Krane, 2001;24)

Pada proses perumusan fungsi distribusi radiasi gelombang Elektromagnetik dikenal dua istilah yang sering digunakan, yaitu "Intensitas" dan "Rapat Energi". **Intensitas** didefinisikan sebagai jumlah daya yang dipancarkan oleh satuan luas permukaan atau dikatakan dengan daya emisi monokromatik, distribusinya ditunjukkan dalam gambar 3.6. Istilah kedua **rapat energi** yang didefinisikan sebagai jumlah energi persatuan volume dalam frekuensi f dan $f + df$ dari spektrum benda hitam dalam kotak bertemperatur diatas suhu mutlak. Pola distribusi rapat energi terhadap frekuensi ditunjukkan dalam gambar 3.5.

Untuk tahap pertama kita akan rumuskan hukum-hukum yang menjelaskan keterkaitan antara intensitas dan panjang gelombang radiasi terhadap perubahan temperatur. Asumsi yang digunakan gelombang elektromagnetik dalam kotak bertindak sebagai **gelombang berdiri** dengan titik simpul pada dinding kotak. Pola gelombang tersebut untuk kotak suatu dimensi diilustrasikan dalam gambar 3.6. Untuk $n = 1$ dikatakan dengan keadaan dasar dan memiliki pola separuh gelombang. Sedangkan untuk $n = 2$ dan $n = 3$ merupakan pola-pola gelombang pada tingkat berikutnya.



Gambar 3.6 Pola amplitudo gelombang berdiri dalam "ruang" suatu dimensi dalam dinding di $x = 0$ dan di $x = L$ untuk tiga bentuk ($n = 1,2,3$)

Untuk bentuk gelombang 3D dan amplitudo dinyatakan dengan fungsi gelombang, maka kondisi fungsi gelombang terjadi:

$$\begin{aligned}
 \Psi(x+Lx, y, z) &= \Psi(x,y,z) \\
 \Psi(x+Lx, y, z) &= \Psi(x,y,z) \\
 \Psi(x+Lx, y, z) &= \Psi(x,y,z)
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

Sementara bentuk umum dari gelombang berdiri memiliki solusi

$$\Psi = e^{ikx} = e^{i(kxx + kyy + kzz)} \quad (3.5a)$$

Karena gelombang beresilasi sesuai dengan kondisi (3.5), maka (misalnya untuk sumbu x) didapat dari gambar 3.6.

Untuk:

$$n_x = 1 \rightarrow L_x = \frac{1}{2} \lambda$$

$$n_y = 2 \rightarrow L_y = \frac{2}{2} \lambda$$

$$n_z = 3 \rightarrow L_z = \frac{3}{2} \lambda$$

.....

$$n_k = n \rightarrow L_k = \frac{n}{2} \lambda$$

Karena $k = 2\pi/\lambda$, maka

$$L_x = \pi n_x / k_x$$

Atau

$$k_x L_x = \pi n_x \quad (3.5b)$$

Dimana n_x adalah bilangan bulat positif, negatif, dan nol atau

$$n_x = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \dots$$

Sehingga jumlah keadaan dalam interval k_x dan $k_x + dk_x$ harus dikali dua, yaitu dari persamaan (3.5b).

$$k_x L_x = 2\pi n_x \quad (3.5c)$$

Dengan demikian dari sifat priodik (3.5) memberikan hasil

$$k_x(n_x + L_x) = k_x + 2\pi n_x$$

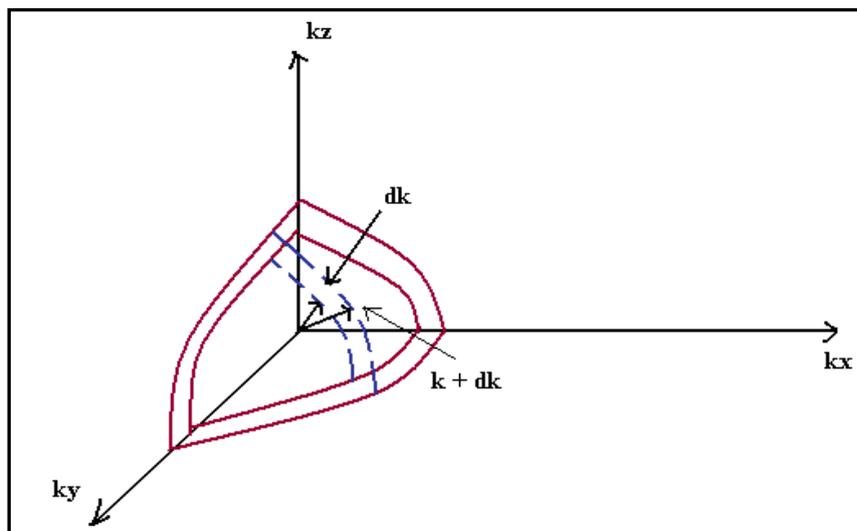
Atau

$$\begin{aligned}k_x &= (2\pi / L_x) n_x \\k_y &= (2\pi / L_y) n_y \\k_z &= (2\pi / L_z) n_z\end{aligned}\tag{3.5d}$$

Untuk k_x terletak di antara rank k_x dan $k_x + dk$, maka bilangan bulat yang mungkin adalah:

$$\begin{aligned}\Delta n_x &= (L_x / 2\pi) dk_x \\ \Delta n_y &= (L_y / 2\pi) dk_y \\ \Delta n_z &= (L_z / 2\pi) dk_z\end{aligned}\tag{3.5e}$$

Ruang k yang kita maksudkan adalah:



Gambar 3.7. Ilustrasi kulit bola

Jumlah keadaan (state) translasi dalam ruang k dinyatakan dengan:

$$\begin{aligned}\rho d^3k &= \Delta n_x \Delta n_y \Delta n_z \\ &= [(L_x/2\pi) dk_x] [(L_y/2\pi) dk_y] [(L_z/2\pi) dk_z] \\ &= [(L_x L_y L_z)/(2\pi)^3] dk_x dk_y dk_z\end{aligned}$$

Atau

$$\frac{\rho d^3k}{V} = \frac{1}{(2\pi)^3} d^3k \tag{3.6a}$$

Dalam hal ini ρ adalah jumlah keadaan per satuan volume. Atau dikatakan juga dengan “**Rapat Keadaan (the state density)**”. Bila partikel dalam kotak merupakan kumpulan foton, maka partikel tersebut bersifat tak TERBEDAKAN dan setiap keadaan BOLEH ditempati oleh lebih dari satu partikel. Ciri partikel seperti sesuai dengan ciri khas dari statistik Bose-Einstein. Bila fungsi partitisi untuk gas foton seperti itu dan ditulis dalam bentuk, maka

$$z = \sum_{n_s} e^{-\beta n_s \epsilon}$$

Sehingga

$$z = \frac{\sum_{n_s} n_s e^{-\beta n_s \epsilon}}{\sum_{n_s} e^{-\beta n_s \epsilon}}$$

Dimana n_s = jumlah rata-rata partikel dalam keadaan tertentu atau S.

Persamaan (3.6b) dapat ditulis menjadi

$$n_s = -\frac{1}{\beta} \frac{\frac{\partial}{\partial \epsilon_s} \sum_{n_s} e^{-\beta n_s \epsilon}}{\sum_{n_s} e^{-\beta n_s \epsilon}}$$

$$n_s = -\frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \epsilon_s} \int \frac{\delta \sum_{ns} e^{-\beta n \epsilon}}{\sum_{ns} e^{-\beta n \epsilon}}$$

$$n_s = -\frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \epsilon_s} \ln \sum_{ns} e^{-\beta n \epsilon}$$

Suku $\sum_{ns} e^{-\beta n \epsilon} = 1 + e^{-\beta \epsilon_s} + e^{-2\beta \epsilon_s} + e^{-3\beta \epsilon_s} + \dots$

$$\sum_{ns} e^{-\beta n \epsilon} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots \quad \text{dengan } x = e^{-\beta \epsilon_s}$$

Definisi lain $(1-x)^{-1} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots$ dengan $x = e^{-\beta \epsilon_s}$

Sehingga dari kedua definisi tersebut didapat

$$\sum_{ns} e^{-\beta n \epsilon} = (1-x)^{-1} = (1 - e^{-\beta \epsilon_s})^{-1}$$

Substitusi hasil ini ke persamaan di atas, maka didapat

$$n_s = -\frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \epsilon_s} \ln(1 - e^{-\beta \epsilon_s})^{-1}$$

$$n_s = \frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \epsilon_s} \ln(1 - e^{-\beta \epsilon_s})$$

$$n_s = \frac{1}{(e^{\beta \epsilon_s} - 1)}$$

(3.6f)

Ini dikatakan dengan distribusi Bose-Einstein atau distribusi Planck. Persamaan (3.6c) memberi gambaran tentang jumlah rata-rata foton dalam masing-masing keadaan ($s = 1, 2, 3, 4, \dots$). Berdasarkan persamaan (3.6a) dan (3.6c) kita dapat menentukan jumlah rata-rata foton per satuan volume $f(k)d^3k$ dalam ruang k , yaitu:

$$f(k)d^3k = n_s p d^3k / v$$

$$f(\mathbf{k})d^3k = \frac{1}{(e^{\beta\epsilon_s} - 1)} \frac{d^3k}{2\pi}$$

Untuk "dua" arah polarisasi dalam rank frekuensi $w + dw$ dan $k = w/c$ didapati:

$$d^3k = 2\pi = 4\pi k^2 dk$$

Dan

$$dk = d\omega/c$$

sehingga

$$2f(\mathbf{k})(4\pi k^2 dk) = 2 \frac{4\pi\omega^2 d\omega}{(2\pi c)^2} = \frac{2\pi\omega^2 d\omega}{(2\pi c)^2}$$

Suku sebelah menyatakan rata-rata foton per satuan volume. Bila kuantitas tersebut kita kalikan dengan energi per foton, maka kita akan dapatkan; Energi rata-rata per satuan volume, yang dinotasikan dengan $k(\omega, t)$, sehingga didapat:

$$l(\omega, t) = \frac{h}{\pi^2 c^2} \frac{\omega^3 d\omega}{(e^{-\beta\epsilon_s} - 1)} \tag{3.6d}$$

Atau

$$l(\omega, t) = \frac{h}{\pi^2 c^2} \left(\frac{kt}{h}\right) \frac{\eta^3 d\omega}{(e^\eta - 1)} \tag{3.6e}$$

Bila kita pilih definisi $kw/kT = \eta$, yang menyatakan perbandingan antara energi foton dengan energi thermol, maka dapat ditulis:

$$\frac{h\omega}{kT_1} = \frac{h\omega}{kT_2} = \eta$$

Andaikata pada T_1 terjadi $I(\omega, t)$ maksimum, bersesuaian dengan W_1 , maka untuk T_2 dan W_2 juga akan didapati $I(\omega, t)$ maksimum, sehingga dapat ditulis:

$$\lambda T = \frac{2\pi c}{K}$$

Rumus ini dikenal dengan "**Hukum pergeseran Wien**". Parameter dikenal dengan konstanta Wien. Selanjutnya untuk Rapat Energi Total $\rho_0(T)$, untuk sebuah frekuensi biasa ditentukan:

$$\rho_0(T) = \int_0^\infty \rho(\omega; r) d\omega$$

Dari persamaan (3.6e) didapat:

$$\rho_0(T) = \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \left(\frac{kT}{\hbar}\right)^4 \int_0^\infty \frac{\eta^3 d\eta}{e^\eta - 1}$$

Selanjutnya dengan memasukkan definisi integral berikut:

$$\int_0^\infty \frac{\eta^3 d\eta}{e^\eta - 1} = \frac{\pi^4}{15}$$

Sehingga persamaan di atas menjadi:

$$\rho_0(T) = \frac{\pi^2 k^4}{15(c\hbar)^3} T^4 \tag{3.8}$$

Bentuk pernyataan (3.8) dikenal dengan "**Hukum Stefan-Boltzman**". Parameter dalam kurung dikenal dengan konstanta Stefan-Boltzman, hasil perhitungan eksperimen didapati,

$$\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{15(c\hbar)^3} = 5.6703 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} \cdot K^4$$

Dengan demikian bentuk (3.8) dapat ditulis menjadi:

$$\rho_0(T) = \sigma T^4 \tag{3.8a}$$

Selanjutnya kita akan turunkan dua perumusan lagi yang menyangkut dengan Radiasi Benda Hitam; perumusan Rayleigh-Jean dan perumusan Planch. Dalam kedua perumusan tersebut kita tetap menganggap seperti dalam ruang 3D. Tinjauan gelombang dari gelombang Era dalam ruang tiga dimensi (3D). Gelombang Era merambat di ruang dalam arah yang didefinisikan oleh α , β , dan γ . Kondisi batas yang terjadi untuk fungsi gelombang dalam ruang tersebut adalah dari syarat batas tersebut dapat dipahami bahwa (simpul) gelombang terletak di dinding kotak, yaitu di $x = 0$ dan untuk sisi y dan z .

Titik potong bidang simpul gelombang dengan masing-masing sumbu memiliki jarak: Bentuk umum dari solusi persamaan gelombang berdiri dinyatakan dalam bentuk Bagian real untuk masing-masing sumbu dinyatakan dengan Persamaan (3.9c) menggambarkan untuk komponen x , bahwa suatu gelombang yang memiliki amplitudo maksimum E_{0x} , variasi dalam ruang dinyatakan lewat sumbu sindan berosilasi dengan frekuensi f . Harga \sin akan nol di titik, yang merupakan tempat-tempat terjadi simpul gelombang. Jarak antara dua simpul dapat ditentukan melalui peninjauan

Selisih keduanya merupakan jarak antara titik simpul, yaitu ini merupakan jarak antara dua simpul seperti ditunjukkan oleh Kuadrat ketiga-tiganya dan penjumlahannya, ini memberi kita gambaran tentang batasan panjang gelombang yang mungkin dimiliki oleh gelombang radiasi dalam kotak. Kita juga dapat menentukan frekuensi yang diizinkan, Jumlah frekuensi yang diizinkan dapat ditentukan melalui ilustrasi ruang 3D dengan n_x , n_y , dan n_z sebagai koordinatnya.

Jadi kita akan menghitung jumlah frekuensi yang diizinkan $N(f)$ df antara interval frekuensi f dan $f + df$. Ini sama dengan jumlah titik yang terisi antara pusat lingkaran berjari-jari r dengan $r + dr$, yaitu $N(r)$ dr . Dalam hal ini $N(r)$ dr sama dengan volume ruang tertutup yang dibatasi oleh sel yang dikalikan dengan jumlah titik kisi.

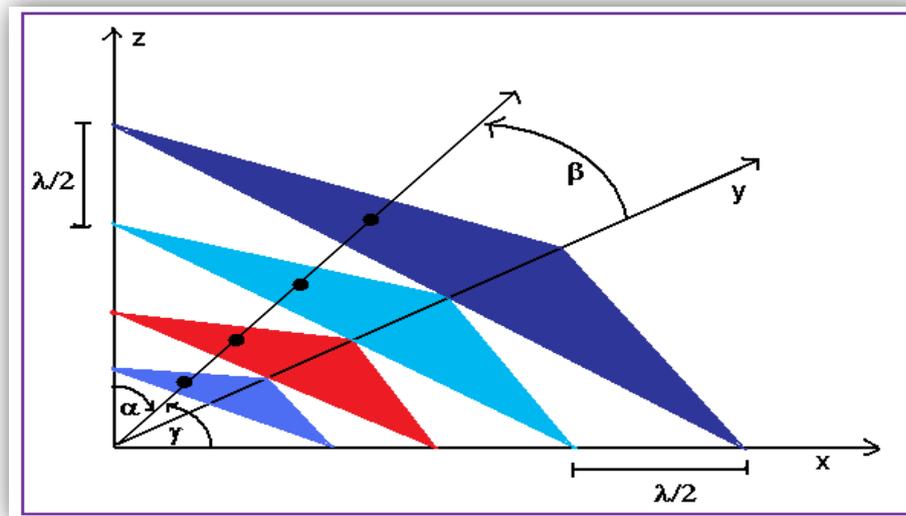
Dari gambar didapati bahwa kerapatan bernilai untuk tiap sel atau dalam suatu sel hanya ada suatu titik kisi, sehingga Karena terdapat dua arah polarisasi dari gelombang era

yang saling bebas, maka Berdasarkan persamaan (3.10b) dapat dikatakan bahwa jumlah frekuensi yang dibolehkan untuk gelombang dalam kotak, hanya tergantung pada volume ruangan (3-D) dan tak tergantung dari bentuk kotak tersebut.

Tinjau gelombang berdiri dari gelombang Elektromagnetik (EM) dalam ruang tiga dimensi. Gelombang EM merambat dalam ruang 3-D dengan arah rambatan didefinisikan oleh α , β , dan γ . Syarat batas yang terjadi untuk fungsi gelombang dalam arah tersebut adalah:

$$\begin{aligned} E = 0 \text{ untuk } & x = 0 & x = a \\ & y = 0 & y = a \\ & z = 0 & z = a \end{aligned} \tag{3.9}$$

Berdasarkan syarat batas tersebut dapat dipahami bahwa noda (simpul) gelombang terletak didinding kotak, yaitu pada $x = 0$ dan $x = a$. Hal yang sama juga terjadi untuk sisi y dan z . Ilustrasinya seperti dalam gambar berikut:



Gambar 3.7a. Bidang simpul gelombang dalam ruang 3-D

Titik potong bidang simpul gelombang dengan masing-masing sumbu memiliki jarak.

$$\cos \alpha = \frac{\lambda/2}{\lambda_z/2}$$

$$\cos \beta = \frac{\lambda/2}{\lambda_y/2}$$

$$\cos \gamma = \frac{\lambda/2}{\lambda_x/2}$$

Atau dapat ditulis menjadi bentuk:

$$\lambda_x/2 = \frac{\lambda}{2\cos \gamma}$$

$$\lambda_y/2 = \frac{\lambda}{2\cos \beta}$$

(3.9a)

$$\lambda_z/2 = \frac{\lambda}{2\cos \alpha}$$

Bentuk umum dari solusi persamaan gelombang berdiri dinyatakan dalam bentuk:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \mathbf{E}_0 e^{-i\omega t} \quad (3.9b)$$

Bagian real untuk masing-masing sumbu dinyatakan dengan

$$E(x,t) = E_{0x} \sin(2\pi/\lambda \cdot x) \sin(2\pi f \cdot t)$$

$$E(y,t) = E_{0y} \sin(2\pi/\lambda \cdot y) \sin(2\pi f \cdot t) \quad (3.9c)$$

$$E(z,t) = E_{0z} \sin(2\pi/\lambda \cdot z) \sin(2\pi f \cdot t)$$

Persamaan (3.9c) menggambarkan bentuk gelombang berdiri untuk komponen medan listrik dari gelombang elektromagnetik. Gelombang EM yang memiliki amplitudo maksimum E_{0x} (misalnya) bervariasi dalam ruang dinyatakan dengan fungsi $\sin(2\pi x/\lambda_x)$ dengan frekuensi osilasi dinyatakan dengan f . Harga $\sin(2\pi x/\lambda_x)$ akan nol pada titik $(2x/\lambda_x) = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$, yang merupakan tempat-tempat terjadi simpul gelombang. Jarak antara dua simpul-simpul dapat ditentukan dengan peninjauan

$$(2x_0/\lambda_x) = 0 \quad (\text{simpul dasar})$$

$$(2x_0/\lambda_x) = 1 \quad (\text{simpul ke-suatu})$$

Selisih keduanya merupakan jarak antara dua titik simpul, yaitu:

$$(2x_1/\lambda_x) - (2x_0/\lambda_x) = 1 - 0 = 1 \text{ atau}$$

$$\Delta x = \lambda_x/2 \quad (3.9d)$$

Ini merupakan jarak antara dua simpul seperti ditunjukkan oleh persamaan (3.9a). Simpul juga terjadi pada jarak $x = y = z = a$, sehingga:

$$2x/\lambda_x = n_x \quad \text{untuk } x = a$$

$$2y/\lambda_y = n_y \quad \text{untuk } y = a \quad (3.9e)$$

$$2z/\lambda_z = n_z \quad \text{untuk } z = a$$

Di mana $n_x = 1, 2, 3, \dots = n_y = n_z$. Selanjutnya kombinasi persamaan (3.9a) dan (3.9e) menghasilkan:

$$(2a/\lambda) \cos \gamma = n_x$$

$$(2a/\lambda) \cos \beta = n_y$$

$$(2a/\lambda) \cos \alpha = n_z$$

Langkah berikutnya adalah dikuadratkan dan dijumlahkan ketiga-tiga suku diatas, iaitu:

$$(2a/\lambda)^2 (\cos^2 \gamma + \cos^2 \beta + \cos^2 \alpha) = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$$

$$(2a/\lambda)^2 = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$$

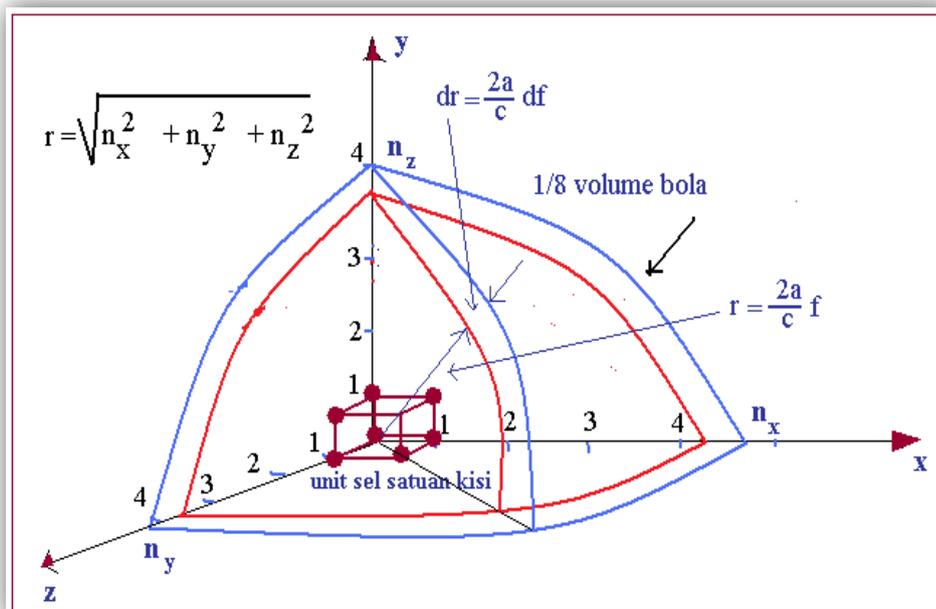
atau

$$\lambda = \frac{2a}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad (3.10)$$

Ini memberi gambaran tentang batasan panjang gelombang yang mungkin dimiliki oleh gelombang radiasi dalam kotak. Kita dapat juga menentukan frekwensi yang diizinkan, yaitu:

$$F = c/\lambda = c/2a = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}$$

Sedang jumlah frekwensi yang diizinkan dapat ditentukan melalui ilustrasi ruang 3-D dengan n_x^2 , n_y^2 , n_z^2 sebagai koordinatnya.



Gambar 3.7b. Ilustrasi rapat titik kisi dalam unit sel berjari-jari r

Berdasarkan ilustrasi gambar 3.7a, kita tentukan jumlah frekwensi yang diizinkan $N(f) df$ antara interval frekwensi f dan $f+df$. Ini sama dengan jumlah titik yang terisi antara pusat lingkaran berjari-jari r dengan $r + dr$, yaitu $N(r) dr$. Dalam hal ini $N(r)dr$ sama dengan volume ruang tertutup yang dibatasi oleh sel dikalikan dengan jumlah titik kisi. Berdasarkan gambar 3.7b didapat kerapatan bernilai 1 untuk tiap sel atau dalam suatu sel hanya ada suatu titik kisi, sehingga.

$$N(r) dr = 1/8 dV$$

$$N(r) dr = 1/8 4\pi r^2 dr$$

Sedangkan nilai r dari gambar 3.7b didapat:

$$r = (2a/c) f \text{ dan}$$

$$2r = (2a/c) df$$

Sehingga gabungannya menjadi:

$$N(f) df = 1/8 4\pi (2a/c)^2 (2a/c) df \cdot f^2.$$

$$N(f) df = \pi/2 (2a/c)^3 f^2 df$$

Karena terdapat dua arah polarisasi gelombang EM yang saling bebas, maka bentuk diatas dapat ditulis menjadi:

$$N(f) df = 2 \cdot \pi/2 (2a/c)^3 f^2 df$$

$$N(f) df = 8\pi (a/c)^3 f^2 df \tag{3.10b}$$

Berdasarkan persamaan (3.10b) dapat dikatakan bahwa jumlah frekwensi yang dibolehkan untuk gelombang dalam kotak, hanya tergantung pada volume kotak (a^3) dan tak tergantung pada bentuk kotak.

Selanjutnya kita dapat juga tentukan energi persatuan volume atau "rapat energi", $\rho(f) df$ dengan cara kita lakukan perkalian antara jumlah frekwensi yang diizinkan persatuan volume dengan besar energi tiap partikel atau,

$$\rho(f) df = (N(f)/a^3) df \cdot \mathbf{E}$$

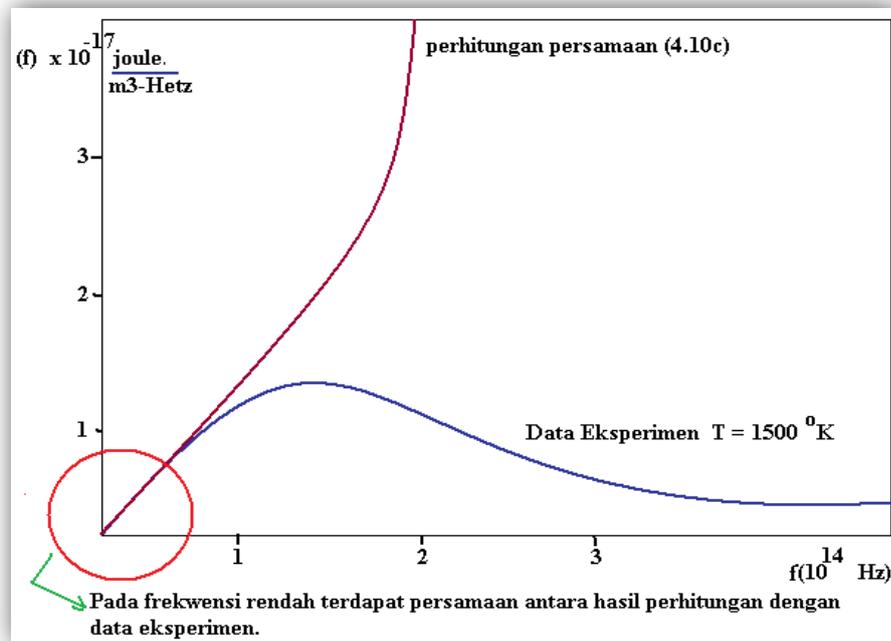
$$\rho(f) df = (8\pi f^2/c^3) \mathbf{E} \cdot df$$

Dengan mengacu pada teori kinetik klasik atau hukum equipartitisi energi yang telah diketahui adalah energi rata-rata sebuah partikel bersuhu T dinyatakan dengan:

$$\mathbf{E} = kT$$

Sehingga bentuk di atas menjadi:

$$\rho(f) df = (8\pi f^2/c^3) kT.df \quad (3.10c)$$



Gambar 3.10. Perbandinga pola spektrum antara teori dan eksperimen

Persamaan (3.10c) dikenal dengan “**Rumusan Rayleigh-Jean untuk radiasi benda hitam**”. Persamaan (3.10c) memberi gambaran tentang pola distribusi rapat energi radiasi beda hitam dalam interval frekuensi f dan $f + df$. Pada temperatur T , kita dapat melihat perbandingan hasil perkiraan (3.10c) dengan data eksperimen, seperti gambar 3.10.

Berdasarkan gambar 3.10 dapat dipahami bahwa pada frekuensi rendah, $f < 10^{14}$ Hz, terdapat kesesuaian antara perkiraan teoritis dengan data eksperimen. Sedangkan pada frekuensi yang lebih tinggi besar spektrumnya tak terhingga, sebaliknya hasil eksperimen menunjukkan adanya puncak spektrum atau tertentu besarnya spektrum. Hasil yang tak real, yang diperkirakan oleh persamaan (3.10c), dalam fisika dikenal dengan ”**Bencana Ultraviolet**”. Oleh karena itulah, Planch berusaha merumuskan teori baru sebagai alternatif dari kelemahan tersebut.

Lebih jauh dari gambar 3.10 dapat dilihat bahwa data eksperimen sesuai dengan teori (3.10c) pada frekuensi rendah atau

Pada saat $f \rightarrow 0$, maka $E \rightarrow kT$ (3.11)

Sebaliknya pada frekwensi tinggi, energi rata-rata akan menuju nol atau,

Pada saat $f \rightarrow \infty$, maka $E \rightarrow 0$ (3.11a)

Berdasarkan persamaan (3.11) dan (3.11a) dapat dilihat bahwa energi rata-rata gelombang datar (standing wave) sebagai fungsi dari frekuensi, ini merupakan asumsi yang digunakan oleh Planch. Hal ini bertentangan dengan hukum- energi dari suatu sistem yang tak tergantung pada frekuensi. Untuk mendapatkan kerapatan energi, kita akan menggunakan bentuk khusus dari distribusi Boltzman

$$P(\varepsilon) = \frac{e^{-\varepsilon/kT}}{kT} \quad (3.11b)$$

Dimana $P(\varepsilon)d\varepsilon$ adalah probabilitas untuk mendapatkan suatu partikel yang berenergi antara ε dan $\varepsilon+d\varepsilon$. Dengan menggunakan persamaan (3.11b), kita dapat menentukan energi rata-rata dari suatu sistem, yaitu:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon p(\varepsilon)}{\sum_{n=0}^{\infty} p(\varepsilon)}$$

Nilai rata-rata di atas digunakan tanda "sigma" atau "jumlah" dalam perhitungannya. Ini didasarkan pada postulat Planch bahwa energi dari suatu partikel bersifat diskontinu dan kelipatan dari $E = nhf$ atau:

$$\varepsilon = 0, hf, 2hf, 3hf, \dots = nhf$$

sehingga

$$\varepsilon = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{nhf}{kT} e^{-nhf/kT}}{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{kT} e^{-nhf/kT}}$$

Jika kita ambil definisi

$$\alpha = \frac{hf}{kT}$$

maka

$$\varepsilon = kT \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n\alpha e^{-n\alpha}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha}}$$

Suku sebelah kanan atas dapat diurai menjadi:

$$\sum_{n=0}^{\infty} n\alpha e^{-n\alpha} = - \sum_{n=0}^{\infty} \alpha \frac{d}{d\alpha} e^{-n\alpha} = -\alpha \frac{d}{d\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha e^{-n\alpha}$$

$$\varepsilon = kT(-\alpha) \frac{d}{d\alpha} \frac{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha}}$$

$$\varepsilon = kT(-\alpha) \frac{d}{d\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha}$$

atau karena $\alpha = hf/kT$

$$\varepsilon = -hf \frac{d}{d\alpha} \ln \sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha}$$

Suku $\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha} = 1 + e^{-\alpha} + e^{-2\alpha} + e^{-3\alpha} + \dots$

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots \text{ dengan } x = e^{-\alpha}$$

atau $(1+x)^{-1} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots$

$$\varepsilon = -hf \frac{d}{d\alpha} \ln(1 - e^{-\alpha})^{-1}$$

$$\varepsilon = -hf \frac{\frac{d}{d\alpha} (1 - e^{-\alpha})^{-1}}{(1 - e^{-\alpha})^{-1}}$$

$$\varepsilon = -hf \frac{(-1)e^{-\alpha}(1 - e^{-\alpha})^{-2}}{(1 - e^{-\alpha})^{-1}}$$

$$\varepsilon = hf \frac{e^{-\alpha}}{(1 - e^{-\alpha})} \cdot \frac{e^{-\alpha}}{e^{-\alpha}}$$

$$\varepsilon = \frac{hf}{(e^{\alpha} - 1)} = \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1}$$

(3.12)

Selanjutnya rapat energi yang memiliki frekuensi antara f dan $f + df$, didapati

$$\rho(f)df = \frac{8\pi f^2}{c^3} E df$$

$$\rho(f)df = \frac{8\pi f^3}{c^3} \frac{h}{e^{hf/kT} - 1} df$$

(3.13)

Persamaan (3.13) dikenal dengan ”**Distribusi Spektrum benda hitam Planch**”. Kita juga dapat menyatakan kerapatan energi dalam bentuk panjang gelombang berdiri. Penurunannya dapat didasari pada suatu kesamaan $\rho(\lambda) d\lambda = -\rho(f) df$. Tanda (-) ini diberikan karena parameter $\rho(\lambda)$ dan $\rho(f)$ kedua-duanya positif dan antara $d\lambda$ dan df memiliki tanda yang berlawanan (artinya pada saat f bertambah, maka λ berkurang atau menurun secara eksperimental. Selanjutnya dari hubungan $f = c/\lambda$ menjadi

$$df = -c/\lambda^2 d\lambda$$

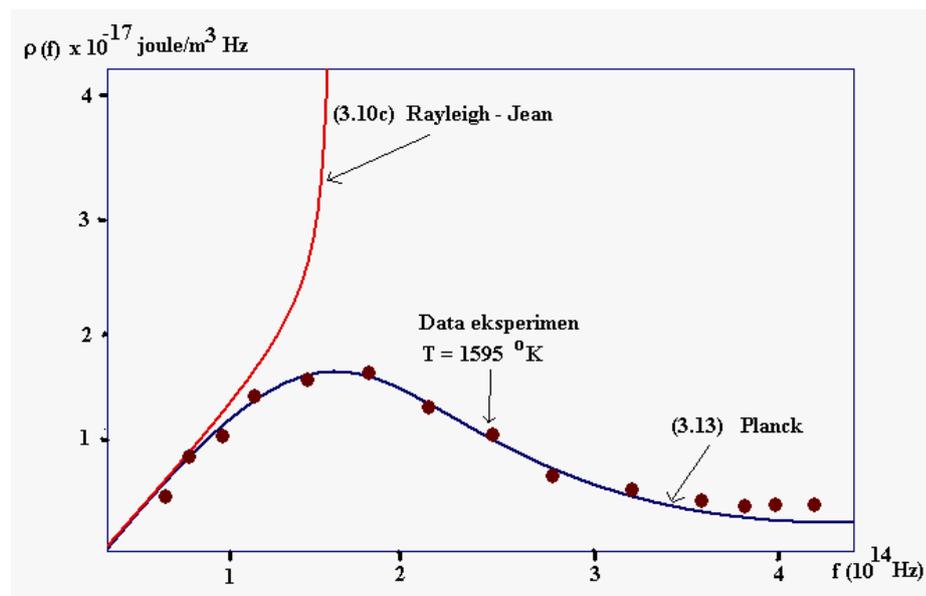
dan

$$\rho(\lambda) = -\rho(f) df/d\lambda = \rho(f) c/\lambda^2. \quad (3.13a)$$

Kombinasi persamaan (3.13) dan (3.13a) didapat,

$$\rho(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi c}{\lambda^5} \frac{h}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda \quad (3.13b)$$

Persamaan (3.13b) ditugaskan kepada pembaca untuk membuktikan penurunannya (PR). "Hukum Stefan" dan "Pergeseran Wien" dapat diperoleh dari persamaan (3.13b). Dengan menggunakan persamaan (3.13) dan (3.10c) kita dapat lihat perbandingan kedua pada pola distribusi dengan data eksperimen pada suhu 1595 °K .



Gambar 3.7a Spektrum radiasi benda hitam

Kesimpulannya perumusan persamaan spektrum radiasi benda hitam oleh Planck secara matematis, sesuai dengan data eksperimen. Sementara hasil perumusan oleh Reyleigh – Jean

mengalami ketaksesuan dengan hasil eksperimen pada frekwensi tinggi, seperti ditunjukkan dalam gambar 3.7a. Sebagai latihan (PR) selidiki betuk perumusan persamaan (3.13) pada kasus frekwensi tinggi.

3.4 Definisi Cahaya

Untuk memahami definisi hakikat cahaya tidak bisa dipisahkan dari pemahaman hasil percobaan yang terkait dengan cahaya. Kajian tentang cahaya telah dimulai pada awal tahun 1675 oleh Isaac Newton. Hasil kajian Newton, yang dikenal dengan teori *Corpuscular*, menunjukkan bahwa cahaya terdiri dari partikel-partikel kecil (*tiny particles*) yang dipancarkan oleh suatu sumber. Walaupun Huygens pada tahun 1678 telah mengemukakan teori gelombang untuk cahaya, namun tetap tidak diterima oleh pakar fisika ketika itu. Sehingga pada tahun 1801 Young menolak teori Newton dengan menunjukkan bahwa hasil percobaan difraksi hanya dapat dijelaskan jika cahaya dipandang sebagai gelombang, bukan sebagai partikel. Pada tahun 1887, Hertz berhasil membuktikan bahwa cahaya bagian dari gelombang elektromagnet dan Maxwell juga berhasil mengembangkan persamaan gelombang elektromagnet.

Pada awal abad ke-20 banyak pakar fisika yang mengembangkan percobaan, antaranya; radiasi benda hitam, efek fotoelektrik, sinar-x, efek Compton, dan spektral garis optik. Fenomena yang ditunjukkan melalui percobaan tersebut hanya dapat dijelaskan jika cahaya dipandang sebagai partikel, bukan sebagai gelombang. Sehingga pada tahun 1901, Max Planck berhasil mengembangkan persamaan energi diskrit untuk partikel-partikel gelombang elektromagnet (cahaya), yaitu; $E = nh\nu$.

Fenomena difraksi dan energi diskrit adalah bukti bahwa cahaya dapat berkelakuan seperti gelombang atau seperti partikel. Oleh karena itu, cahaya dapat kita katakan bukan gelombang dan juga bukan partikel, tetapi dapat berkelakuan seperti gelombang atau seperti partikel.

3.5 Sifat-sifat cahaya

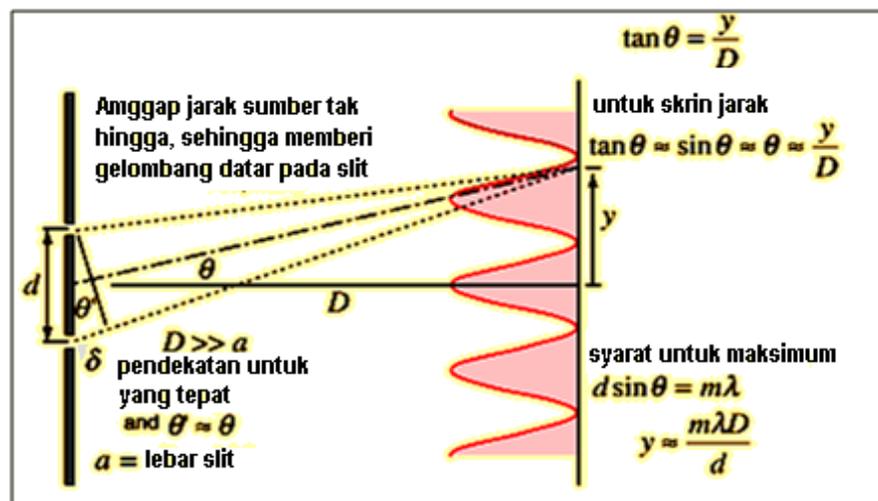
Eksperimen celah ganda yang telah dilakukan Thomas Young adalah untuk mengamati sifat difraksi dan sifat interferensii pada cahaya. Kenyataan ini menjadi pendukung untuk kita katakan cahaya dapat berkelakuan seperti gelombang, yaitu sebagai gelombang elektromagnetik. Sedangkan kita katakan cahaya berkelakuan seperti gelombang, berarti sifat-

sifat yang dapat kita amati adalah panjang gelombang, fenomena difraksi, fenomena interferensi, sifat pemantulan, sifat pembiasan, tenaganya kontinu, dan kedudukannya menyebar dalam ruangan.

Eksperimen efek fotolistrik dan efek Compton adalah dua bukti percobaan yang membolehkan kita untuk mengatakan bahwa cahaya berkelakuan seperti partikel. Jika kita katakan cahaya adalah berkelakuan seperti partikel, maka sifat-sifat yang dapat kita amati adalah adanya percepatan, momentum, energi berbentuk diskrit, dan kedudukannya dapat diukur secara pasti. Ketika cahaya pada posisi dan waktu tertentu berkelakuan seperti gelombang, maka yang dapat diamati sifat-sifat yang menyatu dengan gelombang. Manakala pada posisi dan waktu yang berlainan cahaya dapat berkelakuan seperti partikel, maka dapat diamati sifat-sifat yang menyatu dengan partikel. Tidak pernah kedua sifat tersebut diamati pada posisi dan waktu bersamaan.

Dalam gambar 3.8 berikut ini, merupakan percobaan interferensi yang pernah dilakukan oleh Thomas Young untuk membuktikan bahwa cahaya dapat menunjukkan sifat-sifat gelombang.

Pola yang terbentuk pada layar merupakan pola gelombang transversal yang terdiri dari puncak atau titik terang atau titik maksimum dan lembah atau titik gelap atau titik minimum.

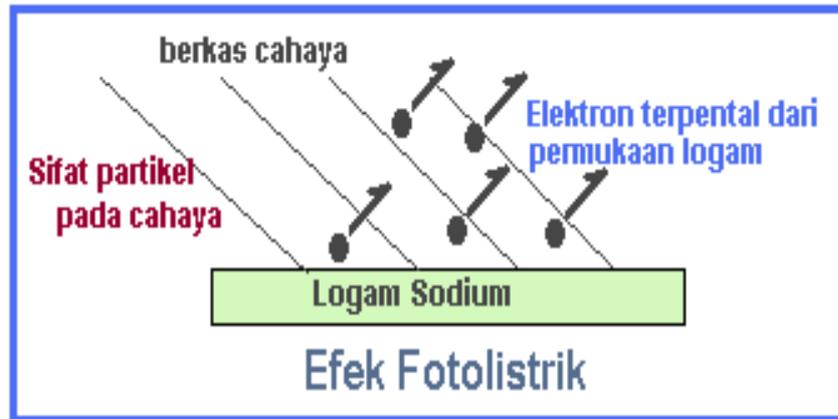


Gambar 3.8 Susunan percobaan celah ganda Thomas Young

(Sumber: www.hyperphysic.phy-astr.gsu.edu)

Tujuan utama percobaan ini bukan untuk menunjukkan terang muncul dari puncak dan gelap muncul dari lembah, tetapi untuk membuktikan bahwa cahaya koheren yang melalui celah

ganda tersebut berkelakuan seperti gelombang. Cahaya **hanya** berkelakuan seperti gelombang, **bukan** untuk menunjukkan bahwa cahaya adalah gelombang.



Gambar 3.9 ilustrasi fenomena efek fotolistrik

Dalam gambar 3.9 berikut merupakan suatu bentuk percobaan untuk membuktikan bahwa cahaya dapat berkelakuan seperti partikel, yang dikenal dengan percobaan efek fotolistrik. Fenomena efek fotolistrik hanya dapat dijelaskan dengan anggapan bahwa cahaya seperti partikel yang disebut dengan foton.

3.6 Contoh fenomena cahaya dalam kehidupan

Dalam bagian ini akan dibentangkan beberapa bentuk penggunaan konsep cahaya dalam kehidupan sehari-hari. Konsep cahaya yang kita maksudkan adalah dapat berkelakuan spertimana gelombang atau seperti partikel.

3.6.1 Sel fotolistrik atau panel surya

Untuk daerah yang terpencil atau jauh dari perkotaan dan sukar dilalui oleh energi listrik konvesional, maka digunakan sel fotolistrik sebagai energi alternatif. Cahaya matahari dari berbagai ukuran frekuensi mengenai sel fotolistrik dan memindahkan elektron dari permukaan logam sel fotolistrik menjadi arus fotolistrik.

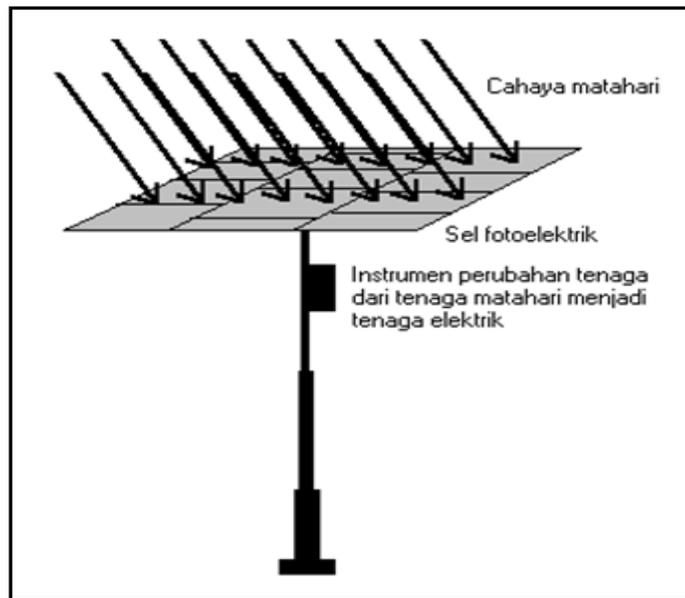


Gambar 3.10. Salah satu contoh panel surya

Melalui suatu perubahan energi matahari dapat dirobah menjadi energi listrik, sehingga dapat digunakan untuk keperluan sehari-hari. Proses menghasilkan energi listrik seperti yang terjadi dalam instrumen pada gambar 3.10 berikut, cahaya dipandang berkelakuan sebagai partikel (yang disebut dengan foton) bukan sebagai gelombang.

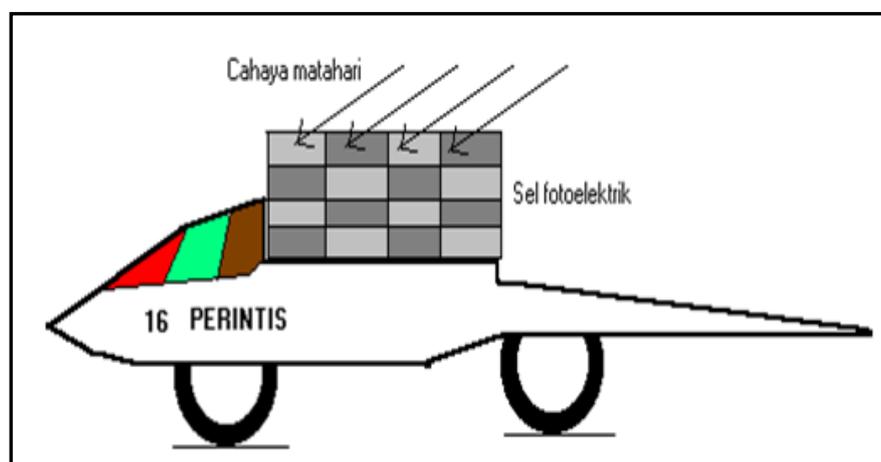


Gambar 3.11. Panel-panel surya yang dipasang di atas atap



Gambar 3.12 Contoh panel atau selsurya

Energi diskrit dari partikel cahaya atau foton dinyatakan dengan persamaan $E = nh\nu$. Dalam gambar 3.10 merupakan salah satu panel surya yang tersisa dalam gudang dari sel surya yang telah dipasang diatas rumah, seperti dalam gambar 3.11. Ilustrasi panel listrik dalam gambar 3.11 secara terperinci ditunjukkan dalam gambar 3.12. Cahaya yang mengenai plat panel surya akan berkelakuan seperti partikel, sehingga terjadi tumbukan dengan elektron.

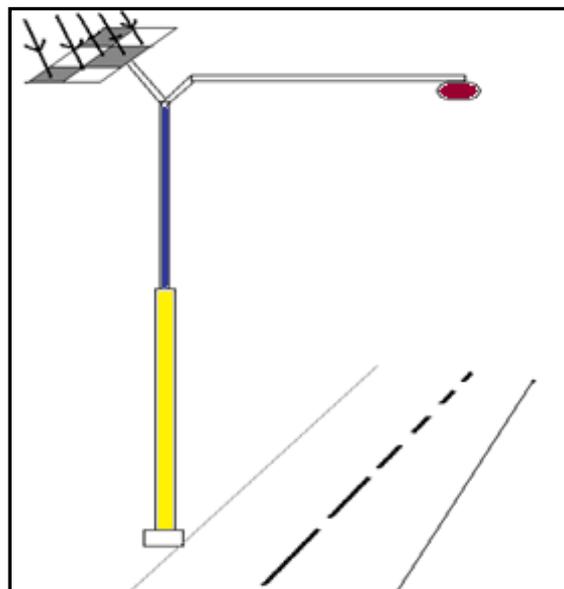


Gambar 3.13 Aplikasi cahaya untuk transportasi

Dalam gambar 3.13 adalah suatu lagi contoh penggunaan cahaya untuk mendapatkan energi listrik untuk menggerakkan kendaraan. Solar cell ditempatkan pada bagian atap kendaraan, agar mengarah langsung ke arah sinar matahari. Besar ukuran panel sel suarya menggambarkan banyak besar energi matahari yang dirubah menjadi energi listrik untuk menggerakkan kendaraan. Pada kasus ini terjadi perubahan dari energi radiasi matahari menjadi energi listrik (yang dilakukan oleh panel surya), kemudian dirubah lagi menjadi energi gerak (yang dilakukan oleh komponen kendaraan tersebut).

Dalam gambar 3.13 adalah suatu lagi contoh penggunaan cahaya untuk mendapatkan energi listrik untuk menggerakkan kendaraan. Solar cell ditempatkan pada bagian atap kendaraan, agar mengarah langsung ke arah sinar matahari. Besar ukuran panel sel suarya menggambarkan banyak besar energi matahari yang dirubah menjadi energi listrik untuk menggerakkan kendaraan. Pada kasus ini terjadi perubahan dari energi radiasi matahari menjadi energi listrik (yang dilakukan oleh panel surya), kemudian dirubah lagi menjadi energi gerak (yang dilakukan oleh komponen kendaraan tersebut).

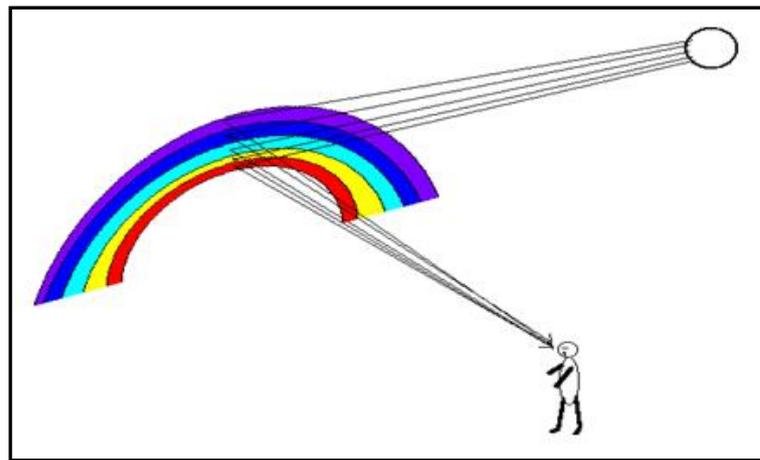
Untuk memenuhi keperluan energi listrik lampu penerangan dikawasan jalan raya yang berada diluar bandar banyak digunakan sel fotolistrik sebagai sumber tenaga. Gambar 3.14 ditunjukkan sel fotolistrik sebagai sumber energi lampu penerangan di jalan raya.



Gambar 3.14 Aplikasi cahaya pada lampu penerangan di jalan raya

3.6.2. Pelangi

Dalam bagian ini kita akan tunjukkan suatu fenomena yang biasa terjadi dalam kehidupan sehari-hari, yaitu terkait dengan pelangi. Fenomena ini terjadi ketika pelangi berada dihadapan pengamat dan matahari berada di belakang pengamat, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 4,15 berikut.



Gambar 3.15 Fenomena difraksi cahaya yang dikenal dengan peristiwa pelangi

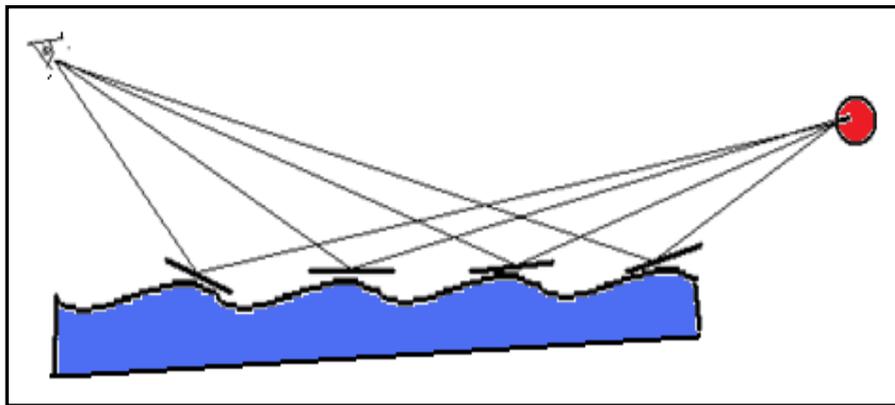
Proses pembentukan pelangi hanya dapat dijelaskan jika cahaya dipandang berkelakuan seperti gelombang dan memperlihatkan fenomena pembiasan cahaya. Ini merupakan salah satu contoh bahwa cahaya adalah gelombang. Bukti bahwa peristiwa pelangi adalah proses pembiasan dan dispersi, ketika terjadi pelangi selalu matahari berada di belakang pengamat.

3.6.3. Banyangan matahari pada permukaan air

Suatu fenomena yang menjadi permasalahan dikalangan mahasiswa banyangan matahari atau bulan yang dibentuk oleh permukaan air. Banyangan yang dibentuk bukan bulat, seperti matahari atau bulan, tetapi memanjang seperti suatu kolom (lihat gambar 3.16).



Gambar 3.16 Banyangan matahari pada permukaan air di pagi hari



Gambar 3.17 Dasar pembentukan banyangan matahari pada permukaan air

Pembentukan banyangan suatu benda sangat tergantung pada bentuk permukaan. Banyangan benda yang dibentuk oleh pantulan sinar pada cermin datar akan menyerupai benda asal (ukuran sama, terbalik, dan seolah-olah ada dibelakang cermin atau maya).

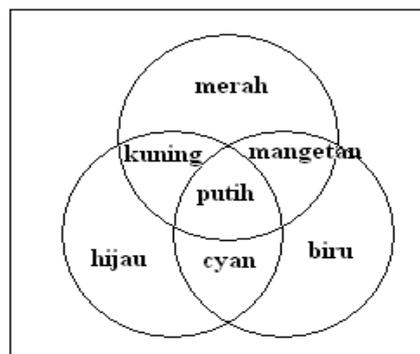
Permukaan licin, akan membentuk banyangan seperti benda asal, permukaan kurang licin membentuk banyangan yang kurang sama dengan benda asal, sedangkan permukaan air yang normal (seperti permukaan air laut yang sebenarnya) banyangan yang dibentuk akan menyerupai kolom (seperti dalam gambar 3.16). Fenomena ini dapat dijelaskan melalui 3.17 berikut. Setiap suatu gelombang pada permukaan air akan memantulkan sinar matahari, seperti yang terjadi pada cermin datar. Campuran dari beberapa banyangan pada setiap suatu gelombang air akan membentuk banyangan matahari seperti kolom.

3.6.4. Tulisan ” 2N1AJUBMA

Mahasiswa kemungkinan pernah melihat perkataan AMBULANS di tulis dengan terbalik didepan kendaraan rumah sakit. Apa tujuan perkataan itu disusun seperti itu? Ini bermaksud agar kendaraan didepan dengan mudah dapat membaca perkataan AMBULANS pada cermin sisi kendaraan (cermin cembung) dengan sisi yang sesuai dan memberi laluan untuk kendaraan jenazah tersebut. Ini merupakan salah satu dari kegunaan pantulan cahaya oleh cermin cembung atau jenis cermin lain yang dapat membentuk bayangan terbalik.

3.6.5. Warna objek

Perpaduan warna adalah salah satu masalah yang sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari. Cahaya merupakan gabungan dari berbagai warna dengan merah, hijau, dan biru sebagai warna utama (primary). Manakala warna sekunder adalah kuning, mangetan, dan kian (cyan). Fenomena penyerapan dan pantulan cahaya telah membentuk berbagai jenis warna-warni dalam kehidupan sehari-hari. Objek yang berwarna merah, akan menyerap seluruh warna, kecuali warna merah atau hanya memantulkan warna merah. Begitu juga dengan objek berwarna biru akan menyerap seluruh warna, kecuali warna biru atau hanya warna biru yang dipantulkan. Untuk suatu objek yang mempunyai kemampuan untuk memantulkan warna biru tetapi cahaya yang datang padanya berwarna kuning (campuran hijau dengan merah) maka objek tersebut akan kelihatan gelap. Dalam gambar 3.18 berikut ditunjukkan suatu metode yang biasa digunakan untuk penggabungan berbagai warna.



Gambar 3.18. Perpaduan berbagai jenis warna

(Sumber: www.oceanexplorer.noaa.gov)

Dalam tabel 3.1 berikut ditunjukkan suatu tabel untuk kemudahan mengetahui warna setiap objek sesuai dengan warna cahaya yang sampai kepadanya. Dalam teori kuantum cahaya dapat berkelakuan seperti gelombang atau seperti partikel, namun cahaya yang datang mengenai suatu objek akan diserap dalam bentuk gelombang elektromagnet dengan berbagai nilai frekuensi (warna). Frekuensi-frekuensi getaran foton cahaya yang bersesuaian dengan frekuensi getaran atom dalam suatu objek akan diserap dan yang berbeda akan dipantulkan. Oleh karena itu, warna suatu objek menurut jenis frekuensi yang dipantulkan oleh objek tersebut.

Tabel 3.1 Perpaduan warna sesuai dengan *filter* masing-masing

	Filter merah	Filter hijau	Filter biru	Filter kuning	Filter mangetan	Filter cyan
Apel merah	merah	hitam	hitam	merah	merah	hitam
Apel hijau	hitam	hijau	hitam	hijau	hitam	hijau
Jeruk	hitam	hitam	hitam	kuning	hitam	hitam
Strawberri	merah	hitam	hitam	merah	merah	hitam

(Sumber: www.oceanexplorer.noaa.gov)

3.7. Kesalahan Konsep Cahaya

Pada bagian ini akan dikemukakan konsep-konsep cahaya yang salah dipahami oleh mahasiswa dan siswa sekolah menengah. Konsep-konsep tersebut sering dijadikan sebagai distraktor dalam naskah soal Ujian Diagnostik Fisika Kuantum (UDFK) atau bentuk tes diagnostik bidang yang lain.

Kesalahan Konsep 1: Tujuan percobaan interferensii untuk menunjukkan bahwa cahaya adalah gelombang

Kelompok peneliti dari Univeristas Andallas mendapati bahwa banyak mahasiswa memahami bahwa tujuan percobaan interferensii untuk menunjukkan bahwa cahaya adalah gelombang. Kesalahpahaman ini berawal dari hasil yang terbentuk pada layar, yaitu pola gelombang transversal, seperti percobaan interferensii dalam gambar pada bagian 3.2. Oleh karena itu,

banyak mahasiswa yang memahami bahwa cahaya adalah gelombang. Sebaliknya hakikat yang sebenarnya objektif percobaan adalah untuk menunjukkan bahwa cahaya dapat berkelakuan seperti gelombang. Hasil penelitian yang dilakukan oleh penulis dengan menggunakan UDFK pada 200 mahasiswa menunjukkan bahwa 21% mahasiswa memahami tujuan percobaan interferensii adalah untuk membuktikan bahwa cahaya adalah gelombang. Ini merupakan suatu pemahaman yang salah, Tujuan sebenarnya percobaan interferensii adalah untuk menunjukkan bahwa cahaya dapat berperilaku seperti gelombang dan sebanyak 52% mahasiswa memilih pemahaman seperti itu (Halim, 2007).

Kesalahan Konsep 2: Pada percobaan pembiasan cahaya terjadi perubahan frekuensi (warna) cahaya.

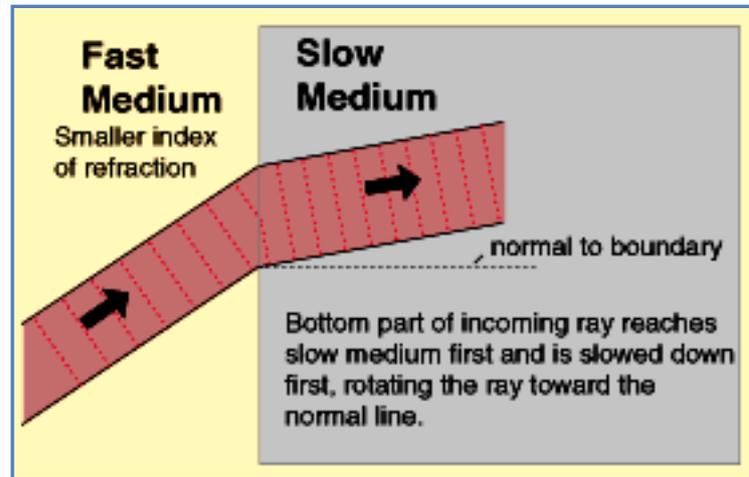
Miskonsepsi jenis ini berasal dari efek perubahan panjang gelombang dan kecepatan cahaya ketika melalui media yang berbeda kerapatannya. Persamaan yang terkait antara kecepatan, frekuensi, dan panjang gelombang cahaya adalah;

$$\lambda = f \cdot v \quad (1) \quad \text{atau} \quad f = \frac{\lambda}{v} \quad (2)$$

Berdasarkan pada persamaan (1), perubahan kecepatan gelombang cahaya akan berefek pada panjang gelombang cahaya. Banyak mahasiswa memahami bahwa perubahan panjang gelombang berbanding lurus dengan perubahan kecepatan dalam persamaan (2) dan juga disertai dengan perubahan frekuensi. Pemahaman yang benar adalah perubahan panjang gelombang sebanding dengan perubahan kecepatan, sehingga frekuensi tidak berubah atau konstan. Ini akan mudah dipahami dengan menunjukkan contoh perhitungan. Untuk masa tertentu panjang gelombang berubah dari 2, 4, dan 8, sedangkan kecepatan pada masa yang sama berubah dari 1, 2, dan 4, maka didapati frekuensi tetap sama, yaitu 2.

Kesalahan Konsep 3: Pada percobaan pembiasan terjadi pembengkokan pada berkas cahaya.

Miskonsepsi jenis ini berasal dari fenomena yang tampak bahwa berkas cahaya melalui media yang berbeda kerapatan akan membengkok (*bending*) dari garis normal, seperti dalam gambar 3.19 berikut.



Gambar 3.19 Fenomena pembiasan cahaya dari medium cepat ke medium lambat

(Sumber: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

Masalah yang muncul adakah berkas cahaya tersebut **benar-benar membengkok** atau hanya **nampak pada mata saja**, sedangkan hakikat yang sebenarnya tidak terjadi seperti itu. Untuk penjelasan lebih lanjut lihat gambar 3.20 berikut dimana ditunjukkan fenomena tersebut yaitu suatu contoh pembiasan objek padat (pencil).



Gambar 3.20 Fenomena pensil dalam air

(Sumber: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

Tampak dengan mata kita bahwa pensil tersebut mengalami kelengkungan, namun pada hakikat yang sebenarnya pensil tersebut tidak mengalami kelengkungan atau pensil tidak patah seperti yang tampak dengan mata kita. Masalah yang sama juga terjadi untuk berkas cahaya yang datang dari udara masuk kepermukaan air.

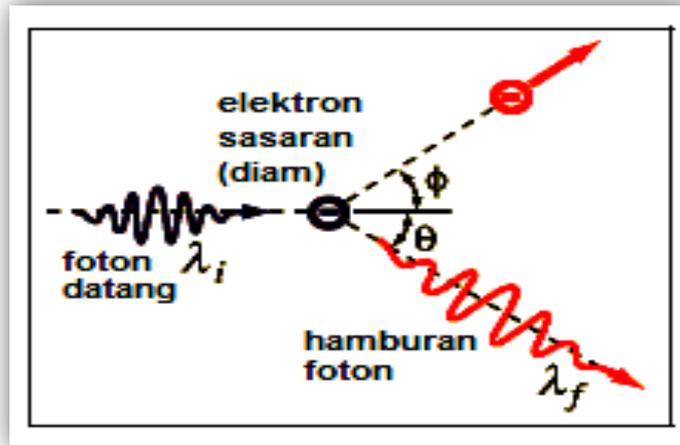
Kesalahan Konsep 4: Manusia normal dapat melihat objek karena adanya partikel-partikel kecil dalam berkas cahaya yang dipantulkan oleh objek sehingga mengenai mata dan terefek untuk melihat benda.

Miskonsepsi disebabkan dari pemahaman bahwa teori kospuler yang dikemukakan oleh Newton, yang menyatakan bahwa manusia dapat melihat objek karena dalam cahaya terdapat partikel-partikel kecil mengenai objek kemudian dipantulkan dan masuk kedalam mata, sehingga manusia terefek melihat benda. Berdasarkan pada hasil kajian menunjukkan bahwa 40% mahasiswa masih memegang pemahaman pada teori kospuler Newton (Halim 2007). Miskonsepsi juga dapat disebabkan dari pemahaman bahwa partikel-partikel kecil yang terdapat dalam cahaya, seperti teori kospuler Newton, disamakan dengan konsep foton, seperti yang dipahami dalam konsep fisika moderen. Kedua-dua pemahaman tersebut **tidak** sesuai untuk menjelaskan jawaban atas pertanyaan kenapa manusia normal dapat melihat benda.

Manusia normal dapat melihat objek karena adanya pantulan cahaya oleh objek dan terbentuk banyangan dalam mata **bukan** karena terdapat partikel-partikel kecil dalam berkas cahaya. Ini sesuai dengan pandangan teori optik geometri dan optik fisis. Fenomena pantulan dan terbentuk banyangan dalam mata merupakan suatu fenomena yang mendukung pandangan bahwa cahaya berkelakuan seperti gelombang.

Kesalahan Konsep 5: Foton adalah sebuah partikel yang mempunyai gelombang di dalamnya

Miskonsepsi ini disebabkan dari pemahaman bahwa foton adalah partikel yang bergerak sesuai dengan gelombang elektromagnet dan juga terdapat dalam beberapa buku teks yang menunjukkan gambar seperti dalam gambar 3.21.



Gambar 3.21 Diagram percobaan efek Compton
(Sumber: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

Miskonsepsi ini dapat juga disebabkan dari pemahaman penafsiran foton dengan kata-kata "paket gelombang". Paket gelombang dipahami sebagai bungkusan kecil yang berisi gelombang, seperti dalam gambar 3.12 di atas. Dalam gambar tersebut, foton dinyatakan dalam bentuk "paket gelombang". Ini merupakan salah satu riil bentuk foton yang sering dijumpai dalam buku-buku teks fisika kuantum universitas. Berdasarkan kepada gambar seperti itu banyak mahasiswa (20%) yang menganggap bahwa foton seperti partikel yang mengandung gelombang didalamnya (Halim 2007).

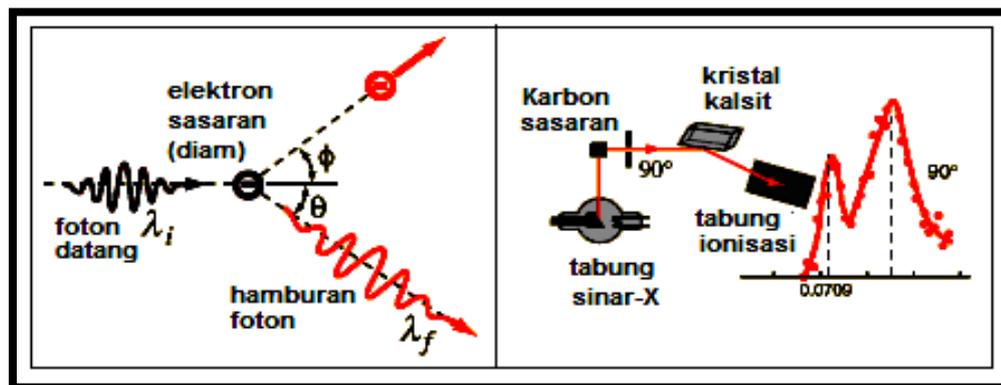
Partikel-partikel dasar (elektron, neutron, dan foton) sampai saat ini belum ada pakar yang mengetahui bentuk yang sebenarnya, apakah bulat, lonjong, atau empat persegi. Pemahaman konsep partikel-partikel dasar akan salah ketika partikel tersebut dikemukakan dalam bentuk gambar. Bahasa yang tepat, foton merupakan suatu sistem kuantum, dimana sifatnya mengikut sifat gelombang elektromagnetik. Dikatakan sistem kuantum, karena dapat berkelakuan ganda, seperti gelombang atau seperti partikel (Fyman, 1964) .

Kesalahan Konsep 6: Cahaya berperilaku seperti gelombang, ketika berinteraksi dengan bahan

Kalimat pernyataan ini sebagian benar, yaitu berperilaku seperti gelombang, tetapi fenomena ini hanya dapat diamati sewaktu cahaya melalui celah ganda sempit dan menampilkan pola interferensii. Hasil kajian yang lalu menunjukkan bahwa 30% mahasiswa memahami bahwa

cahaya berperilaku seperti gelombang, ketika berinteraksi dengan partikel dalam bahan (Halim 2007).

Miskonsepsi ini juga disebabkan dari gambar yang digunakan untuk menjelaskan pola interaksi antara cahaya (foton) dengan bahan seperti dalam gambar 3.22. Dalam efek Compton interaksi terjadi antara elektron diam dengan berkas gelombang elektromagnetik datang yang berkelakuan seperti partikel atau foton.



Gambar 3.22 Grafik percobaan efek Compton
(Sumber: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

Kesalahan Konsep 7: Cahaya adalah gelombang, tetapi dapat berperilaku dengan beberapa sifat partikel

Semua bentuk gelombang mempunyai sifat yang sama, yaitu dapat menunjukkan fenomena pemantulan, pembiasan, difraksi, dan interferensi. Bahkan suatu sistem fisika dikatakan dapat berkelakuan seperti gelombang, jika dapat menampilkan fenomena-fenomena tersebut. Dalam kehidupan sehari-hari mahasiswa dan juga masyarakat biasa dapat mengamati bahwa cahaya selalu menampilkan fenomena pemantulan, pembiasan, difraksi, dan interferensi. Oleh karena itu, banyak mahasiswa yang berfikir bahwa cahaya adalah suatu bentuk gelombang. Pada tahap percobaan lebih lanjut, seperti percobaan efek fotolistrik dan efek Compton, cahaya dapat memperlihatkan fenomena kuantum.

Beberapa fenomena yang wujud dalam percobaan efek fotolistrik tidak dapat dijelaskan dengan hanya menggunakan teori radiasi gelombang elektromagnetik klasik. Berdasarkan hasil percobaan efek fotolistrik dapat dikemukakan beberapa kesimpulan,

-
- (i) Jumlah elektron yang dipancarkan dari suatu logam karena pengaruh sinar cahaya tergantung pada intensitas cahaya.
 - (ii) Energi kinetik maksimum elektron yang dipancarkan tergantung pada frekuensi sinar dan bukannya pada intensitas sinar
 - (iii) Terdapat suatu frekuensi ambang (f_c). Jika sinar yang datang memiliki frekuensi lebih kecil dari frekuensi ambang f_c maka tidak akan terjadi pengeluaran elektron dari permukaan logam walaupun intensitas sinar tersebut diperbesar. Nilai frekuensi ambang ini tergantung pada jenis logam atau tergantung pada karakteristik logam dan tidak tergantung pada intensitas penyinaran.
 - (iv) Elektron akan dikeluarkan segera dari permukaan logam setelah disinari dengan cahaya yang frekuensinya melebihi frekuensi ambang $f > f_c$, walaupun pada intensitas rendah.

Kesimpulan (ii) di atas tidak dapat dijelaskan dengan hanya menggunakan teori gelombang elektromagnet klasik yang dipopulerkan oleh Maxwell. Karena menurut teori tersebut, energi atau intensitas sinar elektromagnet berbanding dengan amplitudo intensitas gelombang elektromagnetik dan bukan dengan frekuensi. Hal ini bertentangan dengan kesimpulan dari eksperimen efek fotolistrik, yaitu kemampuan gelombang elektromagnetik atau cahaya mengeluarkan elektron tergantung pada warna atau frekuensi gelombang EM.

Kesimpulan (iii) di atas juga tidak dapat dijelaskan dengan hanya menggunakan teori gelombang elektromagnet klasik. Menurut teori gelombang EM atom-atom dalam logam akan menyerap energi sinar elektromagnet secara diskrit dan menyebabkan elektron-elektron bergetar sesuai atau sama dengan frekuensi sinar elektromagnet. Atom-atom dalam logam akan terus menyerap energi sinar sehingga cukup untuk membebaskan elektron dari logam tersebut. Oleh karena itu, sinar dengan frekuensi lebih kecil dari frekuensi ambang (f_c) pun masih bisa mengeluarkan elektron, jika diberi waktu yang secukupnya untuk atom mengumpulkan energi, sehingga cukup untuk membebaskan elektron dari logam tersebut. Ini bermakna pengeluaran elektron dapat terjadi untuk semua nilai frekuensi sinar dan tidak ada frekuensi ambang seperti dalam kesimpulan eksperimen. Menurut kesimpulan eksperimen efek fotolistrik, elektron dibebaskan **dengan segera** (tidak ada waktu *delay*) setelah sinar dikenakan pada suatu logam jika sinar itu mempunyai frekuensi melebihi frekuensi ambang. Hasil pengamatan pada percobaan efek fotolistrik selang waktu antara penyinaran dengan pelepasan elektron sekitar 10^{-9} s.

Sebagai kesimpulannya teori elektromagnet klasik gagal untuk menjelaskan fenomena efek fotolistrik terkait dengan wujudnya frekuensi ambang dan pemancaran elektron. Oleh

karena itu, suatu konsep baru mengenai sinar elektromagnet telah dikemukakan oleh Einstein untuk menjelaskan fenomena yang terjadi dalam percobaan efek fotolistrik, yang dikenal dengan "konsep kuantisasi cahaya". Berdasarkan teori yang diusulkan oleh Einstein, energi sinar elektromagnet merupakan suatu kuantum atau korpuskel yang disebut dengan *foton*. Foton merupakan suatu sistem kuantum energi sinar elektromagnet yang dapat diserap dan dipancarkan. Setiap foton mengandung energi yang dinyatakan dengan persamaan

$$E = hf$$

Keberhasilan teori kuantum cahaya dalam menjelaskan fenomena efek fotolistrik menghantarkan kita kepada suatu kesimpulan bahwa cahaya dapat berperilaku seperti partikel. Hasil ini juga menunjukkan satu implikasi lain, dimana sebagian berpikir bahwa cahaya adalah gelombang, tetapi dapat menunjukkan atau berperilaku seperti partikel.

Kesalahan Konsep 8: Cahaya adalah campuran antara gelombang dan partikel

Dalam pemahaman sehari-hari, kata campuran bermakna dalam suatu sistem terdapat dua benda yang dapat dirasakan wujudnya dalam waktu bersamaan. Seperti dalam air diletakkan garam dan gula, maka dalam waktu yang bersamaan air tersebut ada rasa asin dan juga manis. Tetapi tidak pernah dijumpai pada air tersebut dua rasa (asin dan manis) dalam masa dan tempat yang terpisah. Setelah rasa asin wujud pula rasa manis atau sebaliknya. Oleh karena itu, dikatakan bahwa air tersebut merupakan campuran dari garam dan gula.

Apakah untuk gelombang elektromagnetik dapat dikatakan "campuran" antara gelombang dan partikel. Kesalahan pemahaman konsep ini disebabkan dari fenomena yang ditunjukkan oleh cahaya pada dua percobaan yang terpisah, yaitu pada percobaan efek fotolistrik didapati fenomena partikel dan melalui percobaan difraksi, pembiasan, interferensi, dan pemantulan menunjukkan fenomena gelombang.

Berdasarkan dua percobaan tersebut, mahasiswa memahami bahwa cahaya dapat menunjukkan fenomena gelombang dan juga fenomena partikel. Oleh karena itu, mahasiswa berkesimpulan bahwa cahaya merupakan campuran dari gelombang dan partikel. Suatu masalah penting yang tidak atau salah dipahami oleh mahasiswa, yaitu fenomena gelombang dan partikel **tidak** ditunjukkan dalam waktu bersamaan tetapi dalam waktu dan tempat yang terpisah. Oleh karena itu, menurut pandangan ini cahaya tidak tepat dikatakan campuran

antara gelombang dan partikel. Perkataan atau konsep yang lebih tepat adalah cahaya merupakan suatu sistem kuantum yang dapat menunjukkan fenomena gelombang pada suatu waktu atau fenomena partikel pada waktu dan tempat yang lain.

Rangkuman

Bila benda yang dikenai cahaya ukurannya jauh lebih besar dari panjang gelombang cahaya, maka efek pembiasan dan pemantulan yang lebih dominan kelihatannya. Sebaliknya bila ukuran benda tersebut mendekati panjang gelombang cahaya, maka yang lebih dominan adalah efek difraksi dan interferensii. Selanjutnya bila ukuran benda sama dengan panjang gelombang cahaya, maka saat cahaya mengenai benda (ukurannya mendekati ukuran atom), maka cahaya akan diserap dalam bentuk energi radiasi. Kemudian elektron dalam atom akan memanfaatkan energi tersebut untuk membebaskan diri dari ikatan pada atom. Bila elektron berhasil melepaskan diri dari ikatan dengan atom, maka atom tersebut berubah menjadi ion positif atau atom tersebut sudah terionisasi. Pada saat cahaya bertumbukan dengan benda berukuran mikro (seperti atom), maka ia berperilaku sebagai partikel yang dikenal dengan foton. Sementara saat cahaya bertumbukan dengan benda berukuran makro (seperti cermin atau air), maka cahaya berperilaku sebagai gelombang. Dalam bahagian selanjutnya kita akan pelajari beberapa percobaan yang memerlukan definisi cahaya sebagai kumpulan partikel.

Pada temperatur kamar, benda-benda yang tampak kita lihat bukanlah karena memancarkan radiasi thermalnya, tetapi karena cahaya yang dipantulkan oleh benda tersebut dari sumber lain. Jika tidak ada cahaya yang menyinari, maka kita tidak akan dapat melihatnya. Bila temperatur benda dinaikkan, maka benda kelihatan merah, kuning, terus sampai ke warna violet sesuai dengan kenaikan temperatur. Besar intensitas per satuan luas permukaan benda disebut dengan "**Daya emisi monokromatik**" dan dinyatakan dengan $i(\lambda)$.

Percobaan celah-ganda Thomas Young yang dilakukan pada tahun 1801 merupakan suatu percobaan untuk menunjukkan bahwa cahaya dapat memperlihatkan perilaku gelombang, yaitu sifat interferensii dan difraksi. Lebih lanjut James Clerk Maxwell pada tahun 1864 telah memasukkan cahaya kedalam kelompok gelombang elektromagnet dan berhasil merumuskan formula gelombang elektromagnetik dalam ruang vakum. Bukti sejarah ini telah mengajak kita untuk mengatakan bahwa cahaya adalah gelombang, yaitu salah satu gelombang elektromagnetik.

Percobaan efek fotolistrik yang dikaji pertama sekali oleh Heinrich Hertz pada tahun 1887 menunjukkan bahwa radiasi elektromagnet yang diarahkan pada permukaan logam akan menyebabkan "terusir" elektron dari permukaan logam. Pada tahun 1902, Philip Lenard mengamati bahwa energi kinetik fotoelektron **tidak** tergantung pada intensitas cahaya, tetapi tergantung pada frekuensi cahaya. Dengan perkataan lain energi cahaya harus dianggap

berbentuk diskrit, bukan kontinu seperti dipahami oleh teori Maxwell. Sampai pada tahun 1905, Einstein mengusulkan bahwa energi gelombang elektromagnetik atau energi cahaya harus dianggap terkuantisasi dalam bentuk deretan partikel atau kuantum (yang berasal dari kata latin "kuantum" artinya "how much"). Pada tahun 1926 deretan partikel tersebut diberi nama dengan foton. Ini suatu fakta sejarah yang memaksa kita untuk menyimpulkan bahwa energi cahaya berbentuk diskrit atau deretan partikel yang dikenal dengan foton dan ini ditandai dengan awalnya lahir teori radiasi kuantum.

Lalu apa bahasa yang paling sesuai digunakan untuk CAHAYA? Partikel atau Gelombang. Salah kalau kita katakan cahaya adalah partikel atau gelombang, karena cahaya tidak pernah berubah bentuk menjadi partikel atau gelombang. Lebih tepat kita katakan cahaya dapat berkelakuan seperti gelombang atau seperti partikel. Foton yang dianggap sebagai penjelmaan paket energi cahaya dan terdapat dalam berkas cahaya lebih tepat kita sebut dengan istilah "partikel gelombang" atau "sistem kuantum".

Percobaan efek fotolistrik adalah percobaan yang digunakan untuk membuktikan kebenaran sifat partikel pada cahaya. Ternyata terdapat beberapa hasil percobaan efek fotolistrik yang tidak dapat dijelaskan dengan konsep elektromagnet klasik antaranya; (i) Jika frekwensi cahaya dibawah frekwensi ambang materi/bahan, maka **tidak ada** "arus elektron" yang mengalir dalam tabung, walau pun intensitas cahaya dinaikan. (ii) Untuk frekuensi cahaya diatas frekuensi ambang bahan, penambahan intensitas cahaya akan menambah **jumlah** arus elektron yang mengalir dalam tabung. (iii) Energi kinetik elektron yang mengalir dalam tabung **tidak** tergantung pada intensitas cahaya, tetapi hanya tergantung pada frekuensi cahaya.

Percobaan lain yang mendukung bahwa cahaya dapat berperilaku seperti partikel adalah percobaan efek Compton. Proses efek Compton terjadi interaksi antara radiasi elektromagnet dengan elektron diam. Setelah interaksi elektron dan berkas radiasi gelombang elektromagnet terhambur dengan ϕ adalah sudut hamburan antara keduanya. Hasil percobaan menunjukkan bahwa energi radiasi elektromagnet berkurang setelah tumbukan dibandingkan dengan sebelum tumbukan. Berdasarkan konsep tumbukan, proses interaksi antara radiasi EM dan elektron ini dapat dianggap sebagai interaksi antara dua objek yang memiliki masa diam. Oleh karena itu, perumusan teori interaksi ini dapat digunakan hukum kekekalan energi dan hukum kekekalan momentum linear, seperti yang biasa digunakan pada proses interaksi dua benda. Sebagai contoh hasil percobaan efek Compton dengan menggunakan sinar-X ($\lambda = 0.74 \text{ \AA}$) yang diarahkan pada atom grafit. Setelah dihitung ternyata hubungan antara energi foton yang terhambur dengan sudut hamburan yang diperoleh dari hasil eksperimen ternyata cocok

dengan nilai yang diramalkan secara teori. Kesuaian antara hasil percobaan ini dengan ramalan teori, yang dirumuskan berdasarkan hukum kekekalan energi dan momentum linear, menunjukkan bahwa berkas radiasi gelombang elektromagnet berperilaku seperti partikel.

Lebih jauh dapat disimpulkan bahwa tujuan percobaan ini adalah untuk menguatkan teori kuantum dan menolak teori gelombang elektromagnet klasik. Pada percobaan efek Compton terjadi interaksi antara berkas radiasi gelombang elektromagnet dengan elektron. Bukti yang mendukung bahwa berkas radiasi elektromagnet berperilaku seperti partikel dapat dipahami dari fenomena sebelum, pada saat, setelah proses interaksi. Terdapat tiga indikasi pada efek Compton yang dapat dijadikan sandaran untuk mengatakan bahwa gelombang elektromagnetik dapat berperilaku seperti partikel. Pertama, fenomena dan proses tumbukan antara radiasi gelombang EM dengan elektron diam mirip dengan interaksi antara dua partikel yang memiliki masa diam. Kedua, panjang gelombang radiasi elektromagnetik berkurang setelah mengalami interaksi dibandingkan sebelum terjadi interaksi. Ini menunjukkan ada transfer energi dari radiasi ke elektron selama proses interaksi. Ketiga, dalam merumuskan teorinya Compton menggunakan konsep dualisme ($E = hf$), sehingga hasil rumusan sesuai dengan hasil percobaan efek Compton.

Pemahaman konsep elektromagnet klasik, intensitas cahaya berbanding lurus dengan energi atau berbentuk $I = \epsilon_0 c |E|^2$. Artinya penambahan intensitas cahaya akan menaikkan energi cahaya secara malar. Hasil percobaan efek fotolistrik menunjukkan keadaan yang berlawanan, dimana penambahan intensitas tidak terjadi kenaikan energi cahaya, akan tetapi energi cahaya bertambah apabila frekuensi cahaya dinaikan. Kenyataan ini memaksa kita untuk menerima hipotesis Planck dan rumusan Einstein, yaitu untuk energi cahaya dengan rumusan $E \cong h\nu$ dan untuk intensitas cahaya dengan rumusan $I \cong N h\nu$. Parameter N merupakan **jumlah partikel** yang ada dalam berkas cahaya dan bergerak secara diskrit. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa cahaya harus dipandang sebagai aliran paket-paket energi yang kemudian diberi nama dengan foton. Percobaan celah-ganda Thomas Young yang dilakukan pada tahun 1801 merupakan percobaan untuk menunjukkan bahwa cahaya dapat memperlihatkan perilaku gelombang, yaitu sifat interferensi dan difraksi. Lebih lanjut James Clerk Maxwell pada tahun 1864 telah memasukkan cahaya ke dalam kelompok gelombang elektromagnet dan berhasil menunjukkan rumusan formulanya.

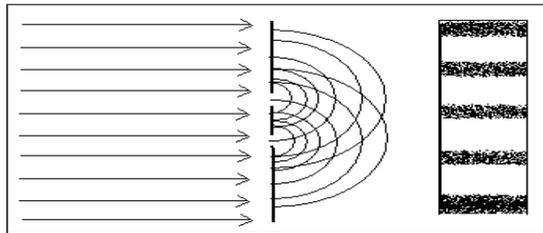
Pola interferensi dari hasil percobaan celah ganda T.Young menunjukkan bahwa berkas cahaya mempunyai bentuk yang sesuai dengan gelombang melintang (transversal). Garis terang dan daerah gelap pada pola interferensi cocok dengan puncak dan lembah pada gelombang melintang. Jarak antara puncak suatu ke puncak berikutnya merupakan tafsiran

panjang gelombang cahaya. Tambahan pula pola interferensi tersebut disebabkan dari proses difraksi cahaya melalui celah ganda. Bukti-bukti ini menjadi pendukung utama untuk mengatakan bahwa cahaya dapat berperilaku seperti gelombang, yang dikelompokkan kedalam kumpulan gelombang elektromagnet.

Fenomena lain, dalam banyak buku teks fisika ditemukan penjelasan bahwa berkas cahaya terjadi pembengkokkan saat melalui dari medium rapat rendah ke medium yang lebih rapat (misalnya dari udara ke air). Adakah fenomena ini benar-benar terjadi atau hanya sekedar pengaruh pada efek penglihatan dengan mata. Fenomena pembengkokkan tidak pernah terjadi pada cahaya. Perlu diingat bahwa cahaya sentiasa bergerak lurus, fenomena pembengkokkan hanya karena faktor penglihatan sahaja. Untuk mendukung pandangan ini dapat dipelajari fenomena pincil yang diletakkan dalam gelas yang berisi air. kelihatannya pincil dalam gelas tersebut mengalami patah atau terjadi pembengkokkan, tetapi pada hakikat sebenarnya pincil tersebut tetap utuh dan tidak terjadi patah.

Latihan

1. Cahaya koheren ditunjukkan pada ganda celah dua akan membentuk pola interferensii seperti dalam gambar di bawah.

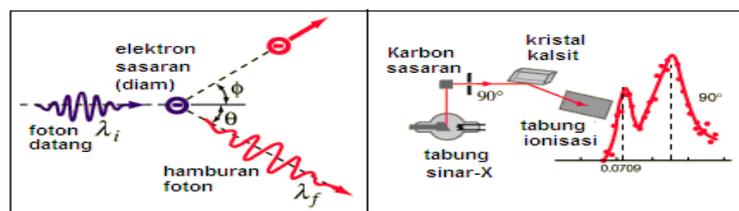


- Tujuan utama percobaan ini adalah untuk
- A. Menunjukkan puncak dan lembah gelombang cahaya
 - B. Membukti bahwa terang keluar dari puncak dan gelap keluar dari lembah gelombang
 - C. Membuktikan bahwa muka sinar dan gelombang adalah sama
 - D. Menunjukkan bahwa cahaya adalah gelombang
 - E. Menunjukkan bahwa cahaya mempunyai sifat-sifat gelombang
2. Pada percobaan pembiasan cahaya, terjadi salah suatu pernyataan di bawah ini :
 - A. Frekuensi (warna) cahaya berubah
 - B. Sifat-sifat cahaya berubah
 - C. Terjadi kelengkungan pada berkas cahaya
 - D. Frekuensi (warna) cahaya tidak berubah
 - E. Laju cahaya tetap, yaitu 3×10^6 m/s
 3. Manusia normal dapat melihat benda, karena
 - A. Karena adanya partikel-partikel kecil dalam berkas cahaya yang dipantulkan oleh objek sehingga mengenai mata dan terefek untuk melihat benda.
 - B. Karena bayangan objek terbentuk dalam mata
 - C. Karena adanya cahaya matahari atau cahaya lampu lainnya
 - D. Karena objek dapat memantulkan cahaya
 - E. Karena adanya pantulan cahaya oleh objek dan terbentuk bayangan dalam mata.

4. Berbagai konsep, teori, dan hipotesis telah dikemukakan oleh pakar fisika tentang bentuk dan hakikat FOTON yang sebenarnya. Diantara lima pernyataan di bawah, pilih salah satu jawaban yang paling benar menurut anda.

- A. Foton adalah sebuah partikel yang mempunyai gelombang di dalamnya
- B. Foton adalah gumpalan/potongan energi yang ditransfer dari/ke gelombang EM
- C. Foton adalah suatu sistem kuantum, sifatnya sesuai dengan sifat gelombang EM
- D. Foton adalah gelombang, tetapi dapat menunjukkan beberapa sifat partikel
- E. Foton sebuah partikel, sebagaimana halnya elektron.

5. Pernyataan di bawah berkaitan dengan proses interaksi antara cahaya tampak dengan bahan (lihat gambar: bukan seperti kejadian yang sebenarnya), pernyataan yang benar adalah:



- A. Interaksi sama seperti tumbukan antara dua objek padat.
 - B. Cahaya berperilaku seperti partikel ketika berinteraksi dengan bahan
 - C. Cahaya berubah menjadi partikel ketika terjadi interaksi dengan bahan
 - D. Tidak pernah terjadi interaksi antara cahaya dengan bahan
 - E. Cahaya berperilaku seperti gelombang, ketika berinteraksi dengan bahan
6. Berbagai macam bentuk teori dan eksperimen telah dilakukan oleh pakar fisika untuk mengetahui hakikat yang sebenarnya tentang CAHAYA. Lima pernyataan di bawah, anda diminta untuk memilih salah satu jawaban yang paling sesuai.
- A. Cahaya adalah campuran antara partikel dan gelombang
 - B. Cahaya dapat berperilaku seperti partikel atau seperti gelombang
 - C. Cahaya adalah gelombang
 - D. Cahaya adalah partikel
 - E. Cahaya adalah gelombang, tetapi dapat berperilaku dengan beberapa sifat partikel

-
7. Buktikan kembali persamaan (3.2) dengan menggunakan persamaan (3.2a)
 8. Buktikan persamaan (3.6f)
 9. Dalam konteks penyerapan dan pemancaran radiasi apa beda antara benda hitam sempurna dengan benda biasa.

Glossarium

Cahaya bukan gelombang elektromagnet atau juga bukan partikel atau bukan juga campuran antara keduanya. Cahaya merupakan suatu sistem kuantum yang dapat menunjukkan fenomena gelombang atau fenomena partikel pada waktu dan tempat yang terpisah, bukan pada pada waktu dan tempat yang bersamaan.

Sifat cahaya yang paling dominan adalah seperti gelombang elektromagnet atau seperti partikel. Kedua sifat tersebut ditunjukkan oleh dua hasil percobaan yang berbeda, yaitu percobaan efek fotoelektrik dan percobaan interferensii cahaya. Sebagai gelombang, cahaya dapat menunjukkan sifat pemantulan, difraksi, interferensii, pembiasan, dan polarisasi, sebagaimana halnya yang sring terjadi pada gelombang elektromagnet.

Percobaan interferensii adalah untuk menunjukkan bahwa cahaya dapat berperilaku seperti gelombang, yaitu dapat menunjukkan pola gelombang transversal. Bukan untuk menunjukkan bahwa cahaya datang dari puncak dan gelap datang dari lembah gelombang cahaya.

Percobaan pembiasan merupakan pembelokan cahaya yang hanya terjadi perubahan panjang gelombang dan kecepatan cahaya, sedangkan frekuensi cahaya tetap tidak berubah. Fenomena pelengkungan berkas cahaya hanya pada penglihatan dengan mata, sedangkan hakikat yang sebenarnya tidak terjadi perubahan pada arah gerak cahaya. Fenomena pembending dapat diketahui dari pinsil yang diletakkan dalam cawan berisi air. Nampak dengan mata, pinsil, mengalami pelengkungan, namun pada hakikatnya tidak mengalami perubahan atau pelengkungan.

Foton merupakan suatu sistem kuantum yang mempunyai energi *diskrit* (terpisah) antara suatu bagian dengan bagian yang lain. Foton mempunyai sifat sesuai dengan sifat gelombang elektromagnet. Energi foton berbanding dengan frekuensi gelombang elektromagnet, bukan dengan intensitas radiasi gelombang elektromagnet.

Cahaya Sebagai Partikel maksudnya cahaya dapat berperilaku seperti partikel. Fenomena ini pernah dikemukakan oleh Newton dan para ilmuwan mulai meyakini ide yang dikemukakan

oleh Huggens. Hal ini disebabkan banyak eksperimen (seperti peristiwa difraksi, refleksi, interferensi, dst) dapat ditunjukkan oleh cahaya.

Intensitas didefinisikan sebagai jumlah daya yang dipancarkan oleh satuan luas permukaan atau dikatakan dengan daya emisi monokromatik.

Rapat energi yang didefinisikan sebagai jumlah energi persatuan volume dalam frekuensi f dan $f + df$ dari spektrum benda hitam dalam kotak bertemperatur diatas suhu mutlak.

Daya Emisi monokromatik adalah besar intensitas persatuan luar permukaan benda yang dinyatakan dengan $i(\lambda)$. Intensitas cahaya yang dipancarkan oleh satuan luas benda untuk daerah panjang gelombang $d\lambda$ disekitar λ

Bencana Ultraviolet merupakan penambahan frekuensi kearah yang lebih tinggi sehingga besar spektrumnya tak terhingga, sebaliknya hasil eksperimen menunjukkan adanya puncak spektrum atau tertentu besarnya spektrum.

Daftar Pustaka

- Arya, A.P. 2003. *Elementary Modern Physics*. California: Addison-Wesley.
- Beiser, A. 2001. *Concepts of Modern Physics* (3rd edition). New York: McGraw-Hill Inc.
- Feynman, 1964. *The Feynman Lectures on Physics Vol III*, Addison-Wesley, USA
- Halim A, 2007. *Pengembangan dan Aplikasi Ujian Diagnostik Fisika Kuantum (UDFK)*, Pendidikan Sains, UKM.
- Halim A, 2008. *Dokumen (foto dan grafik) Mata Kuliah Fisika Modern*, FKIP Unsyiah (tidak dipublikasi)
- Krane, K. 2001. *Fisika Modern*. Diterjemahkan oleh Hans J. Wospakrik. 1992. Jakarta, Indonesia: UI-Press.
- Kusminarto. 1993. *Pokok-pokok Fisika Modern*. Jakarta: DIKTI.
- Serway, R.A., Moses, C.J. & Moyer, C.A. 2005. *Modern Physics* (3rd Edition). United Kingdom: Thomson.
- Taylor, J.R., Zafiratos, C.D., Dubson M.A. 2003. *Modern Physics for Scientists and Engineers* (2nd Edition). Pearson, London: Prentice-Hall.
- Sutrisno. 2003. *Fisika Dasar: Fisika Modern*. Bandung: Penerbit ITB.