

MODUL V

FISIKA MODERN

RADIASI BENDA HITAM

Tujuan instruksional umum :

- Agar mahasiswa dapat memahami tentang radiasi benda hitam

Tujuan instruksional khusus :

- Dapat menerangkan tentang radiasi termal
- Dapat menerangkan tentang radiasi benda hitam
- Dapat menerangkan tentang intensitas radiasi benda hitam
- Dapat menerangkan tentang teori spectrum benda hitam

Buku rujukan :

Fisika modern Halliday-Resnick

Johanes Surya Olimpiade Fisika

5.1. RADIASI TERMAL

Benda yang mempunyai temperature lebih tinggi akan memancarkan panas pada lingkungannya dikenal dengan istilah radiasi termal.

Berdasarkan hasil pengamatan eksperimen diperoleh bahwa banyaknya radiasi termal yang dipancarkan oleh suatu benda dipengaruhi oleh:

1. Suhu Benda

Benda yang lebih tinggi temperaturnya memancarkan radiasi yang lebih banyak.

2. Sifat Permukaan Benda

Permukaan yang kasar lebih banyak memancarkan radiasi daripada permukaan yang halus.

3. Bentuk Benda atau Luas Permukaan Benda

Permukaan yang lebih luas akan memancarkan radiasi yang makin banyak.

4. Jenis Material

Tungsten dapat memancarkan radiasi dengan laju $23,5 \text{ w/cm}^2$. Sedangkan molybdenum (dengan ukuran dan bentuk yang sama) hanya meradiasikan $19,2 \text{ w/cm}^2$.

Pada tahun 1879 Josep Stefan merumuskan intensitas radiasi yang dipancarkan oleh suatu benda. Menurut pengamatan besarnya intensitas I, ini sebanding dengan suhu T pangkat empat.

$$I = KT^4$$

K merupakan suatu constant yang bergantung pada sifat benda dan sering ditulis sebagai

$$K = e$$

e = emisivitas yang besarnya $0 < e < 1$ (tanpa satuan)

= tetapan Stefan.Boltz mann

$$= 5,67 \times 10^{-8} \text{ watt/ m}^2\text{K}^4$$

Sehingga $I =$ 5.1.

Untuk menghitung daya P yang dipancarkan oleh benda:

$$P = I \cdot A$$

Atau $P = e$ 5.2.

Persamaan 5.2. dikenal dengan rumusan Stefan.Boltzmann. Stefan menemukannya berdasarkan eksperimen yang dikonfirmasi melalui perhitungan teori termodinamika oleh Ludwid Boltzmann.

Contoh:

Daya yang dipancarkan oleh permukaan benda yang bersuhu 500K dan luasnya 2m^2 dan emisivitas benda 0,8 adalah:

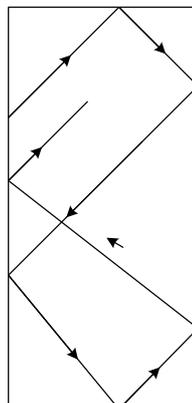
$$\begin{aligned} P &= \\ &= 0,8 \cdot 5,67 \times 10^{-8} (5 \times 10^2)^4 \\ &= 5670 \text{ watt} \end{aligned}$$

Benda yang mempunyai temperatur $T > T_0$ tidak hanya mempunyai sifat memancarkan radiasi saja melainkan juga dapat menyerap radiasi yang dipancarkan oleh lingkungan atau benda disekitarnya.

Jika sebuah benda mula-mula lebih panas dibandingkan lingkungannya, benda ini akan turun suhunya kerana laju pemancaran radiasi (energi panas) lebih besar dari penyerapan radiasi. Pemancaran ini berlangsung terus sampai suhu benda dan lingkungannya seimbang ini dinamakan keseimbangan termal. Pada keseimbangan termal, panas yang dipancarkan benda sama dengan panas yang diserap dari lingkungannya.

5.2. Radiasi Benda Hitam

Benda hitam didefinisikan sebagai benda dimana radiasi yang jatuh akan diserap seluruhnya (tidak ada yang dipantulkan). Benda hitam sempurna sukar didapatkan jelaga yang sangat hitam masih mempunyai daya pantul meskipun kecil sekali. Suatu lubang kecil pada sebuah dinding berongga dapat dianggap sebagai benda hitam sempurna.



Gambar 5.1
Seberkas sinar mengenai lubang
Pada dinding berongga

Sinar yang masuk pada dinding berongga dengan lubang kecil sinar akan dipantulkan berkali-kali oleh dinding berongga dan setiap kali dipantulkan intensitasnya selalu berkurang (karena sebagian sinar diserap dinding) sampai suatu saat energinya kecil sekali (hampir nol). Jadi dapat dikatakan bahwa sinar yang mengenai lubang tidak keluar lagi itulah sebabnya lubang ini dinamakan Benda Hitam. Semakin kecil lubang semakin mirip dengan benda hitam sempurna (karena semakin sedikit peluang keluarnya sinar tersebut).

Pada saat benda hitam dipanaskan atau benda berongga dipanaskan misalnya suhu T maka dinding sekeliling rongga akan memancarkan radiasi dan memantulkan sebagian radiasi yang datang (dan menyerap sisanya).

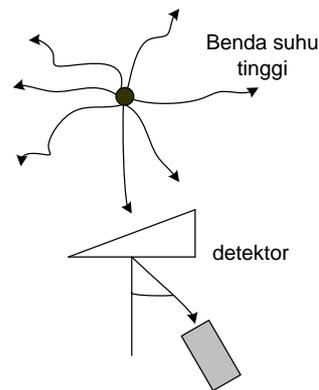
Peristiwa penyerapan dan pemancaran oleh tiap-tiap bagian dinding berongga akan berlangsung terus menerus hingga terjadi keseimbangan termal. Pada keadaan seimbang termal suhu bagian dinding yang sudah sama besar sehingga radiasi yang dipancarkan sama dengan energi yang diserapnya, dalam keadaan ini didalam rongga dipenuhi oleh gelombang-gelombang yang dipancarkan oleh tiap titik pada dinding rongga. Radiasi dalam rongga ini bersifat uniform.

Jika dinding rongga diberi sebuah lubang maka radiasi ini akan keluar dari lubang radiasi yang keluar, ini dapat dianggap sebagai radiasi Benda Hitam.

5.3. Intensitas Radiasi Benda Hitam

Ketika benda berongga dipanaskan, electron atau molekul-molekul pada dinding rongga akan mendapatkan energi sehingga bergerak dipercepat. Menurut teori elektromagnetik muatan yang dipercepat akan memancarkan energi radiasi. Radiasi inilah yang dipercaya orang sebagai sumber radiasi benda hitam.

Karena gerakan-gerakan muatan ini acak dan percepatannya berbeda-beda maka panjang gelombang radiasi yang dipancarkan oleh setiap muatan tidak sama. Untuk mengetahui besarnya intensitas untuk tiap panjang gelombang, kita dapat menggunakan peralatan yang diagramnya digambarkan pada **Gambar. 5.2**.



Gambar 5.2 Radiasi akan mengenai sebuah prisma yang akan mengurai berkas radiasi yang datang (seperti matahari menjadi berbagai warna) dengan mengatur sudut θ kita dapat mengukur intensitas radiasi untuk tiap panjang gelombang.

Gambar 5.3 melukiskan grafik intensitas I radiasi benda hitam sebagai fungsi panjang gelombang pada gambar terdapat 4 buah kurva masing-masing untuk suhu benda hitam 1600 K, 1800 K, 2000 K dan 2200 K. Pada gambar tampak bahwa spectrum kontinu (artinya semua panjang gelombang ada) Perlu dicatat bahwa I adalah radiasi benda hitam untuk panjang gelombang tertentu saja. Untuk menghitung intensitas total yang dipancarkan benda hitam kita harus menghitung luas di bawah kurva I sebagai fungsi λ . Besarnya intensitas total ini sama dengan yang diperoleh dari rumus Stefan-Boltzman dengan mengambil $e = 1$ (untuk benda hitam)

$$I = \sigma T^4$$

Hal ini menarik dari ke 4 kurva pada gambar 5.3 adalah bahwa setiap kurva mempunyai satu nilai maksimum yang terjadi pada panjang gelombang dinamakan λ_{maks} . Jika diperhatikan dengan seksama λ_{maks} bergeser ketika suhu benda hitam dinaikkan. Makin tinggi suhu makin pendek λ_{maks} .

Hasil pergeseran panjang gelombang maksimum ini ternyata sesuai dengan apa yang terjadi pada benda (logam) yang dipanaskan. Ketika logam mulai dipanaskan, terlihat logam menjadi merah (radiasi yang dipancarkan logam mempunyai λ_{maks} sama dengan panjang gelombang sinar merah: 6500 A) kemudian jika suhu logam dinaikkan (dibawa titik leburnya) logam berubah menjadi kuning (λ_{maks} bergeser lebih pendek menjadi panjang gelombang sinar kuning: 5500A). Jika suhunya sangat tinggi logam akan tampak kebiru-biruan (panjang gelombang biru sekitar 4500A).

Hukum Wien

Hubungan panjang gelombang λ_{maks} dengan suhu benda diamati oleh Wien. Pengamatannya memberikan hasil bahwa panjang gelombang maksimum berbanding terbalik dengan suhu benda T.

$$\lambda_{maks} = b \frac{1}{T}$$

$$\text{atau } \lambda_{maks} T = b$$

dengan b merupakan tetapan yang pembanding yang besarnya diperoleh dari hasil eksperimen. $b = 2,898 \times 10^{-3} \text{ mK}$

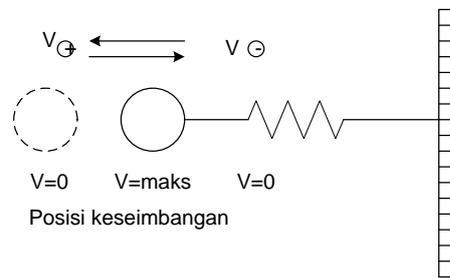
Rumus (3) dinamakan hukum pergeseran Wien. Istilah pergeseran merujuk pada pergeseran puncak kurva ketika suhu berubah.

5.4. Teori spektrum radiasi benda hitam

Kurva intensitas radiasi benda hitam yang digambarkan pada gambar 5.3 telah menarik perhatian para Fisikawan sejak permulaan abad ke-20. Berbagai teori telah dicoba untuk menerangkan mengapa bentuk kurva intensitas radiasi adalah seperti pada GB 5.3, namun semuanya mengalami kegagalan.

Lord Rayleigh dan James Jeans mengusulkan suatu model untuk menerangkan bentuk kurva ini. Mereka menganggap bahwa muatan-muatan di dinding (permukaan) benda berongga dihubungkan oleh semacam pegas. Ketika suhu benda dinaikkan, muatan-muatan ini mendapatkan energi kinetiknya untuk bergetar. Dengan bergetar berarti muatan berubah-ubah kecepatannya (positif-nol-negatif-nol-positif...dst) lihat gambar 5.4 dengan kata lain muatan selalu mendapatkan

percepatan setiap saat. Muatan yang dipercepat inilah yang menimbulkan radiasi benda hitam.



Gambar 5.4

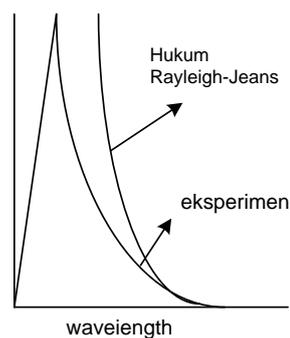
Dengan model ini Rayleigh dan Jeans menurunkan rumus intensitas I radiasi benda hitam untuk panjang gelombang tertentu. Mereka mendapatkan,

$$I_{\lambda} = \frac{2\pi ckT}{\lambda^4}$$

dengan $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K adalah konstanta Boltzmann.

Model yang diusulkan oleh Rayleigh dan Jeans ini berhasil menerangkan kurva spectrum intensitas radiasi benda hitam pada panjang gelombang yang besar, namun gagal untuk panjang gelombang yang kecil.

Gb 5.5 melukiskan hasil perhitungan Rayleigh –Jeans dibandingkan dengan hasil eksperimen. Terlihat bahwa pada panjang gelombang pendek, ramalan teori Rayleigh –Jeans gagal total. Rumus Rayleigh –Jeans meramalkan bahwa pada $\lambda \Rightarrow 0$, intensitas $I_{\lambda} \Rightarrow \infty$, ini sangat bertentangan sekali dengan hasil eksperimen.



Gambar 5.5

Model klasik lain diusulkan Wilhelm Wien pada tahun 1900. Model ini dibuat dengan menganggap benda hitam seperti sebuah selinder berisi radiasi benda hitam (gelombang elektromagnetik). Dinding selinder bersifat pemantul sempurna dan piston dapat bergerak turun-naik. Radiasi ini mampu memberikan tekanan pada

piston(mirip dengan tekanan gas pada piston). Dengan ekspansi adiabatic-isotermik, kita dapat menghitung usaha yang dilakukan oleh tekanan radiasi ini sebagai fungsi intensitas. Wien berhasil menghitung distribusi intensitas sebagai fungsi panjang gelombang untuk suhu tertentu ia memperoleh rumus berikut ;

$$I_{\lambda} = \frac{A}{\lambda^5} e^{-e/\lambda T}$$

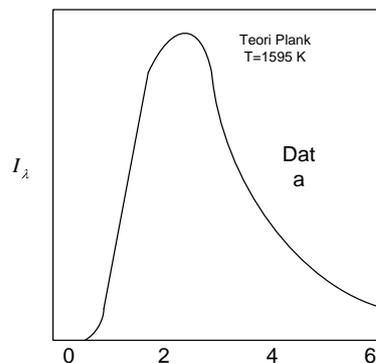
Dengan rumus ini Wien mampu menjelaskan kurva I_{λ} sebagai fungsi λ pada panjang gelombang pendek, namun gagal menjelaskan pada panjang gelombang panjang! Hasil ini menunjukkan bahwa radiasi elektromagnetik tidak dapat dianggap sesederhana seperti proses termodinamika.

Pada tahun 1900 juga Max Planck menurunkan rumus untuk radiasi benda hitam dan ia berhasil secara spektakuler menerangkan bentuk kurva I sebagai fungsi λ Rumus Yang diperoleh Max Planck sebagai berikut :

Dengan h adalah konstanta yang dinamakan konstanta Planck.

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

Gb. 5.6. melukiskan bagaimana akuratnya hasil perhitungan Planck ini. Pada panjang gelombang panjang rumus Planck mendekati rumus Rayleigh-Jeans.



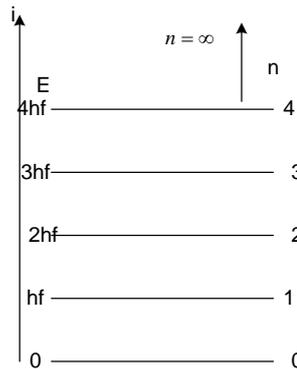
Gambar 5.6

Dalam menurunkan teorinya ini Planck memakai anggapan seperti Rayleigh-Jeans yaitu dengan menganggap radiasi yang dihasilkan oleh muatan atau molekul yang bergetar. Disamping itu ia menambah dua asumsi (anggapan) yang sangat berani dan controversial mengenai osilasi molekul-molekul pada dinding benda berongga.

1. Molekul-molekul yang berosilasi akan memancarkan energi diskrit (tidak kontinu). E_n yang diberikan dengan rumus

$$E = nhf$$

Dengan n merupakan bilangan bulat positif yang dinamakan **bilangan kuantum** dan f adalah frekwensi getaran molekul-molekul ini. Energi dari molekul dikatakan **terkuantisasi** dan keadaan-keadaan dimana energi diperbolehkan dinamakan keadaan kuantum (“Quantum States”). Gb. 5.7. melukiskan keadaan kuantum dengan energi yang bertingkat-tingkat (tingkat energi) yang diusulkan Planck.



Gambar 5.7

2. Molekul memancarkan atau menyerap energi dalam satuan-satuan energi yang diskrit yang dinamakan kuantum (belakangan disebut **foton**). Tiap foton mempunyai energi sebesar

$$E = hf$$

Molekul akan memancarkan atau menyerap energi hanya ketika ia berubah keadaan kuantumnya. Jika ia tetap pada suatu keadaan kuantum tidak ada energi yang dipancarkan atau diserap.

Dengan asumsinya yang berani dan radikal ini, Planck berhasil memelopori terbukanya cabang baru fisika yaitu **mekanika kuantum**.

Contoh :

Suatu massa $m = 0.02$ Kg digantungkan pada suatu pegas yang konstanta pegasnya 2 N/m. massa ini berisolasi dengan amplitude 10 cm. Berapa bilangan kuantum n dari energi isolasi massa ini?

Jawab :

Energi total system pegas

$$E = \frac{1}{2} KA^2 = \frac{1}{2} 2 \cdot (0,1)^2 = 0,01 \text{ J}$$

Frekuensi isolasi

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{0,02}} = \frac{5}{\pi} \text{ Hz}$$

dengan rumus Planck tentang energi yang terkuantisasi kita dapat menghitung besarnya n :

$$E = nhf$$

$$n = \frac{E}{hf} = \frac{0,01}{6,6 \times 10^{-34.5/\pi}} = 9,52 \times 10^{30}$$

angka ini sangat besar sekali ini artinya system yang besar kuantisasi energi tidak tampak dengan kata lain energi dapat dianggap kontinu.