

BAB V

RADIASI

Radiasi adalah proses perpindahan panas melalui gelombang elektromagnet atau paket-paket energi (photon) yang dapat merambat sampai jarak yang sangat jauh tanpa memerlukan interaksi dengan medium.

Perpindahan kalor secara radiasi dirumuskan:

$$q = (T^4 - T_{\infty}^4)$$

Dari persamaan di atas bahwa kalor radiasi harganya sangat dipengaruhi oleh perubahan temperatur.

Radiasi elektromagnet terdiri atas beberapa jenis, diantaranya adalah radiasi termal. Radiasi ini merambat dengan kecepatan cahaya (3×10^{10} m/s). Secara matematis bisa dihitung dengan:

$$C = \lambda f$$

dimana C = kecepatan cahaya (m/s)

λ = Panjang gelombang (μm)

f = frekwensi (Hz)

Radiasi termal adalah proses perpindahan panas melalui paket-paket energi yang disebut photon (kuantum), dimana menurut Planck setiap kuantum mengandung energi sebesar:

$$h = 6,625 \times 10^{-34} \text{ J-s}$$

Setiap kuantum adalah suatu partikel yang mempunyai energi, massa dan momentum. Hubungan massa dan energi dari partikel dikaitkan dengan persamaan:

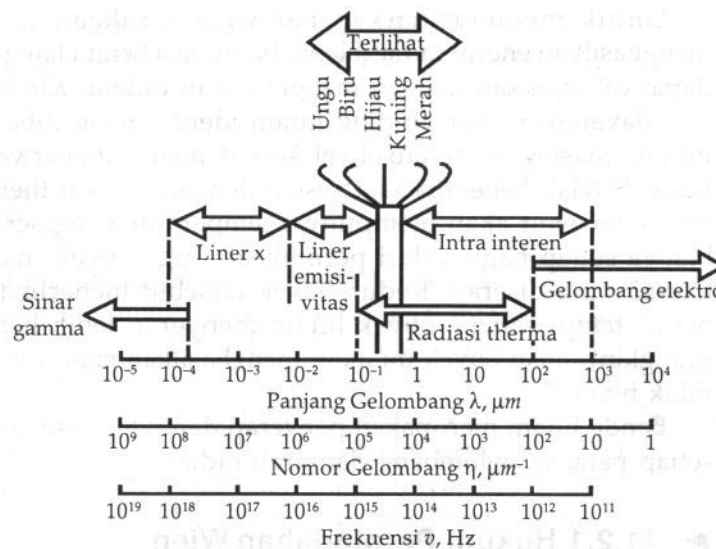
$$E = m \cdot c^2 = h f$$

$$m = h f / c^2$$

$$\text{Momentum} = c (h f / c^2) = h f / c$$

Laju energi yang dipindahkan tergantung kepada beberapa faktor:

1. Temperatur (permukaan yang memancar dan yang menerima radiasi).
2. Emisivitas (permukaan yang teradiasi)
3. Refleksi, absorpsi, dan transmisi.
4. Faktor pandang antara permukaan yang memancarkan dan yang menerima radiasi (sudut pandang antara manusia terhadap sumber radiasi). Gambar 1 menunjukkan pengelompokan gelombang-gelombang elektromagnet.



Gambar 1. Spektrum Gelombang elektromagnet.

SIFAT SIFAT RADIASI

Apabila suatu gelombang elektromagnetik mengenai suatu permukaan atau medium maka gelombang tersebut bisa dipantulkan atau diteruskan oleh media tersebut. Pada saat melalui medium, gelombang secara berkelanjutan akan mengalami pengurangan. .

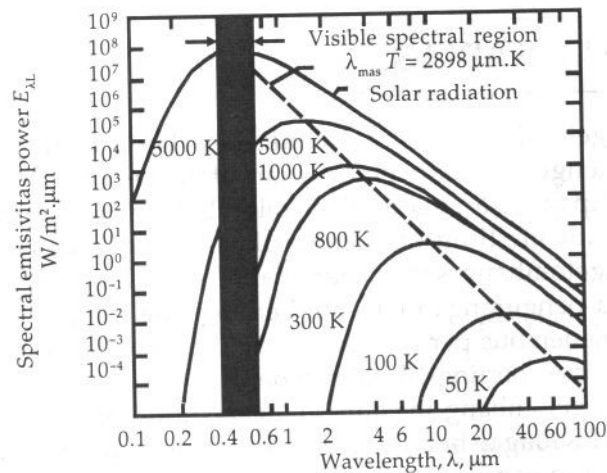
Jika pengurangan tersebut berlangsung sampai tidak ada lagi gelombang yang akan menembus permukaan yang dikenainya maka permukaan ini disebut sebagai benda yang bertingkah laku sebagai benda hitam. Jika gelombang melalui suatu medium tanpa mengalami pengurangan, hal ini disebut sebagai benda/permukaan transparan. Jika hanya sebagian dari gelombang yang mengalami pengurangan maka medium disebut sebagai permukaan semi transparan.

Permukaan benda hitam tidak akan memantulkan cahaya radiasi yang diterimanya,

karenanya benda hitam disebut sebagai benda penyerap palig baik, dan benda tersebut terlihat berwarna hitam.

Hukum Perpindahan Wien

Dari gambar 2, terlihat bahwa distribusi *spectral* benda hitam, mempunyai panjang gelombang maksimum yang tergantung kepada temperatur.



Gambar 2. Hubungan antara panjang gelombang terhadap temperatur.

Daya emisi spectral maksimum terletak pada panjang gelombang yang makin pendek dengan pertambahan temperatur, sesuai persamaan berikut:

$$\lambda_{maks} T = C_3$$

dimana, $C_3 =$ konstanta radiasi ($2897,8 \mu\text{m}$)

DAYA EMISI

Sebelum membahas lebih lanjut mengenai radiasi ini maka perlu dijelaskan bahwa tanda λ menunjukkan perbedaan antara *spectral* dan *total*. Tanda θ menunjukkan antara *directional* dengan *hemispherical*.

Setiap medium secara berkelanjutan akan menghasilkan radiasi elektromagnet secara acak ke seluruh arah. Benda yang mempunyai permukaan kasar akan mempunyai sifat refleksi rendah, serta emisivitas dan absorpsi tinggi. Hal ini berlaku sebaliknya untuk permukaan licin dan dipoles.

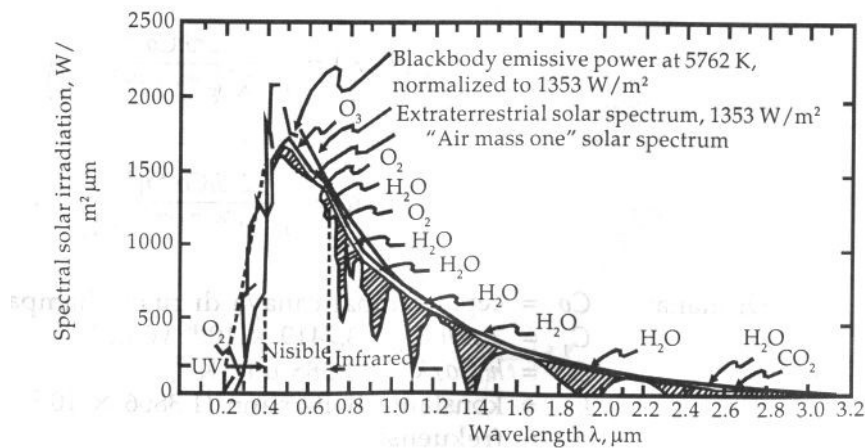
Fluks kalor radiasi yang dihasilkan permukaan sebuah benda disebut sebagai *daya emisi*, E . Secara lengkap total daya emisi *hemispherical* dapat didefinisikan sebagai berikut:

Laju di mana radiasi yang dihasilkan per satuan luas pada semua panjang gelombang yang mungkin dan pada semua arah yang mungkin.

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda) d\lambda$$

Spektrum Daya Emisi Benda Hitam

Matahari dapat mencapai sifat benda hitam pada temperatur 5762 K. Spektral fluks matahari yang sampai ke bumi atau *solar irradiation* untuk kondisi ekstraterrestrial dan masa udara satu ditunjukkan oleh gambar 3 berikut. (catatan: radiasi matahari akan mengalami pengurangan pada saat dia memasuki atmosfer).



Gambar 3. Irradiasi matahari yang memasuki bumi.

Perbedaan antara total dan spektral daya emisi suatu permukaan adalah:

1. Spektral, daya emisi E_{ν}

$$\frac{\text{Energi emisi}}{\text{Waktu} \cdot \text{Permukaan} \cdot \text{Frekuensi}}$$

2. Spektral, daya emisi E_{η}

$$\frac{\text{Energi emisi}}{\text{Waktu} \cdot \text{Permukaan} \cdot \text{No. gelombang}}$$

3. Spektral , daya emisi E_λ

$$\frac{\text{Energi emisi}}{\text{Waktu} \cdot \text{Permukaan} \cdot \text{Panjang gelombang}}$$

4. Spektral , daya emisi E

$$\frac{\text{Energi emisi}}{\text{Waktu} \cdot \text{Permukaan}}$$

Daya emisi E_λ digunakan untuk menghitung daya emisi dari suatu permukaan yang bersifat menyerap atau menghasilkan energi radiasi. Daya emisi E_η digunakan untuk menghitung radiasi pada gas. Daya emisi E_ν digunakan untuk menghitung energi radiasi dimana tidak terjadi perubahan frekuensi dari sinar radiasi tersebut pada saat melewati suatu permukaan menuju permukaan lainnya. Dari postulat Planck, mengasumsikan bahwa sebuah molekul dapat menghasilkan photon hanya pada tingkat energi tertentu. Planck menemukan bahwa daya emisi suatu permukaan benda hitam yang dikelilingi oleh medium transparan dengan indeks refraktif, n sebagai:

$$E_{b\nu}(T, \nu) = \frac{2\pi h \nu^3 n^2}{C_0^2 (e^{h\nu/kT} - 1)}$$

$$E_{b\lambda}(T, \lambda) = \frac{2\pi h C_0^2}{n^2 \lambda^5 (e^{hC_0/n\lambda kT} - 1)} \quad n = \text{konstan}$$

$$E_{b\eta}(T, \eta) = \frac{2\pi h C_0^2 \eta^3}{n^2 (e^{hC_0\eta/nkT} - 1)} \quad n = \text{konstan}$$

dimana, C_0 = cepat rambat cahaya di ruang hampa

$$C_1 = 2\pi h C_0^2 = 3,7419 \times 10^{-16} \text{ W m}^2$$

$$C_2 = h C_0/k = 14,388 \text{ } \mu\text{m.K}$$

$$k = \text{konstanta Boltzman} = 1,3806 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$\nu = \text{frekuensi}$$

Hubungan antara $E_{b\nu}$, $E_{b\lambda}$ dan $E_{b\eta}$ adalah:

$$E_{b\nu} d\nu = E_{b\lambda} d\lambda = E_{b\eta} d\eta$$

Persamaan ini lebih sering digunakan hanya jika indeks refraktif tidak tergantung kepada frekuensi, panjang gelombang dan nomor gelombang, yaitu pada kondisi di ruang vakum dimana $n = 1$ atau medium gas dimana $n \approx 1$. Persamaan ini juga dapat diterima untuk

medium semi transparan dimana nilai $1,52 < n < 1,68$ diantara panjang gelombang $0,2 \text{ s/d}$ $2,4 \mu\text{m}$ diasumsikan n konstan.

Daya Emisi Total Benda Hitam

Daya emisi total dari benda hitam bisa diperoleh dari persamaan berikut:

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_{b\lambda}(T, \lambda) d\lambda = C_1 n^2 T^4 \int_0^{\infty} \frac{d(n\lambda T)}{(n\lambda T)^5 [e^{\zeta/(n\lambda T)} - 1]}$$

$$E_b(T) = n^2 \tau T^4$$

dimana: $\tau =$ konstanta Boltzman

$$\tau = \frac{\pi^4 C_1}{15 C_2} = 5,670 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Seringkali diperlukan perhitungan untuk memperoleh nilai daya emisi antara dua panjang gelombang, seperti λ_1 dan λ_2 :

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_b \lambda d\lambda = \frac{C_1}{C_2} \frac{C_1/n\lambda_1 T}{C_2/n\lambda_2 T} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{\xi^3 d\xi}{e^{\xi} - 1} n^2 T^4$$

$$f(n\lambda T) = \frac{\int_0^{\lambda} E_b \lambda d\lambda}{\int_0^{\infty} E_b \lambda d\lambda} = \int_0^{n\lambda T} \left(\frac{E_b \lambda}{n^3 \tau T^5} \right) d(n\lambda T) = \frac{15}{\pi^4} \int_{C_2/n\lambda T}^{\infty} \frac{\xi^3 d\xi}{e^{\xi} - 1}$$

sehingga:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b2} d\lambda = [f(n\lambda_2 T) - f(n\lambda_1 T)] n^2 \tau T^4$$

Persamaan terakhir merupakan fungsi dari variabel tunggal, $n\lambda T$ yang dapat dilihat nilainya pada tabel di lampiran.

Permukaan benda hitam adalah permukaan ideal yang mempunyai sifat-sifat:

1. Benda hitam menyerap semua radiasi yang disengaja (irradiasi) tanpa melihat panjang gelombang dan arah datangnya sinar.

2. Pada semua temperatur dan panjang gelombang yang diijinkan, tidak ada permukaan yang dapat menghasilkan energi lebih banyak daripada benda hitam.
3. Walaupun emisi radiasi yang dihasilkan benda hitam adalah fungsi dari panjang gelombang dan temperatur, tetapi tidak tergantung kepada arah datangnya sinar.

Spektrum Daya Emisi Benda atau Permukaan Tidak Hitam

Permukaan yang tidak hitam disebut sebagai permukaan aktual yang menghasilkan dan menyerap radiasi lebih sedikit dari permukaan benda hitam. Daya emisi total dari permukaan aktual pada temperatur T dapat dicari dengan:

$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T^4$$

dimana: ε = emissivitas dari permukaan aktual

Daya emisi spektral dari benda tidak hitam dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$E_\lambda = \varepsilon_\lambda E_{b\lambda} = \varepsilon_\lambda (C_1 \lambda^{-5} / e^{C_2/\lambda T} - 1)$$

dimana: ε_λ = emisivitas monokromatik

Hubungan antara E dengan E_λ dapat dilihat dari persamaan berikut:

$$E = \varepsilon \tau T^4 = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \int_0^\infty \varepsilon_\lambda E_{b\lambda} d\lambda$$

atau

$$\varepsilon = (1/\tau T^4) \int_0^\infty \varepsilon_\lambda E_{b\lambda} d\lambda$$

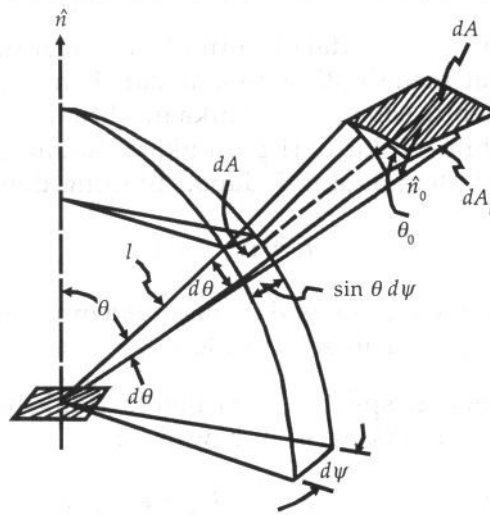
Jika ε_λ tidak bergantung λ maka $\varepsilon = \varepsilon_\lambda$ permukaan yang mempunyai kondisi seperti inilah yang kita sebut sebagai permukaan kelabu.

INTENSITAS RADIASI

Laju dari emisi yang berasal dari dA_1 dan menuju dA_n disebut sebagai *Intensitas Spektral*

I_λ dari radiasi emisi. Jadi definisi dari intensitas spektral I_λ adalah: laju dimana energi radiasi yang dihasilkan pada panjang gelombang λ , pada arah (θ, φ) persatuan luas permukaan emisi normal terhadap arah (θ, φ) persatuan sudut $d\Omega$ dan persatuan panjang gelombang $d\lambda$.

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \varphi) = \frac{dq}{dA_1 \cos \theta d\theta d\Omega d\lambda}$$



Gambar 5. Proyeksi sinar radiasi yang mengenai suatu permukaan seluas dA pada panjang gelombang λ dan arah (θ, φ) .

$$d\Omega = \frac{dA_n}{r^2}$$

dimana:

$$dA_n = r^2 \sin \theta d\theta d\varphi, \text{ maka}$$

$$d\Omega = \frac{r^2 \sin \theta d\theta d\varphi}{r^2}$$

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$$

Perbedaan antara intensitas spektral dan total:

1. Intensitas Spektral, $I_\lambda =$ laju energi radiasi/waktu/luas normal terhadap sinar/sudut

solid/panjang gelombang.

2. Intensitas Total, I = laju energi radiasi/waktu/luas permukaan normal terhadap sinar/sudut solid.

Persamaan yang menghubungkan antara intensitas spektral dengan intensitas total adalah:

$$I(r, \hat{s}) = \int_0^{\infty} I_{\lambda}(r, \hat{s}, \lambda) d\lambda$$

dimana: r = vektor posisi

\hat{s} = satuan vektor arah

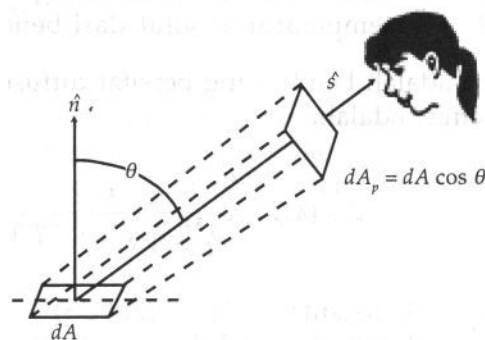
Energi yang dihasilkan dari permukaan seluas dA pada arah \hat{s} dan pada sudut solid $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$, maka intensitas dapat didefinisikan sebagai:

$$I(r, \hat{s}) dA_p d\Omega = I(r, \hat{s}) dA \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi$$

dimana: dA_p = proyeksi luasan dA arah normal terhadap sinar datang.

Jika persamaan tersebut diintegrasikan pada semua arah yang mungkin maka akan diperoleh total energi yang dihasilkan dari luasan dA , setelah terlebih dahulu dibagi dengan luasan dA itu sendiri.

$$E(r) = \int_0^{2\lambda} \int_0^{\pi/2} I(r, \theta, \varphi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \int_0^{2\lambda} I(r, \hat{s}) \hat{n} \hat{s} d\Omega$$



Gambar 6. Hubungan antara daya emisi benda hitam dengan intensitas.

Persamaan di atas juga berlaku untuk hubungan antara emisi dan intensitas *spektral* dari suatu permukaan. Hubungan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$E_{b\lambda}(r, \lambda) = \pi I_{b\lambda}(r, \lambda)$$

Directional, spectral daya emisi dapat diketahui dengan membandingkan antara *hemisphere, spectral* intensitas (laju energi per satuan sudut solid, per satuan luasan normal terhadap sinar datang) dengan *directional, spectral* fluks yang dihasilkan.

$$E'_{b\lambda}(r, \lambda, \theta, \varphi) dA = I_{b\lambda}(r, \lambda) dA_p$$

atau

$$E'_{b\lambda}(r, \lambda, \theta, \varphi) = I_{b\lambda}(r, \lambda) \cos \theta$$

Persamaan di atas dikenal dengan *hukum Lambert* atau *hukum cosine*.

DISTRIBUSI PLANCK

$$I_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hC_0^2}{\lambda^5 [\exp(hC_0/\lambda kT) - 1]}$$

dimana: h = konstanta Planck ($6,6256 \times 10^{-34}$ J.s)

k = konstanta Boltzman ($1,3805 \times 10^{-23}$ J/K)

C_0 = kecepatan cahaya di ruang vakum

T = temperatur absolut dari benda hitam

Benda hitam bersifat *diffuse* (pengemisi hamburan) maka spektral daya emisi adalah:

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]}$$

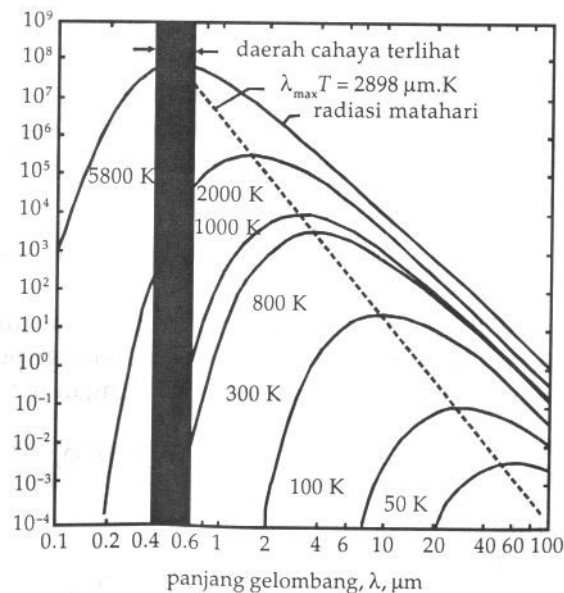
dimana: C_1 = konstanta radiasi ($2\pi h C_0^2$)

$$(2\pi h C_0^2) = 3,742 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m/m}^2$$

$$C_2 = h C_0/k = 1,439 \times 10^4 \mu\text{m.K}$$

Dari distribusi di atas, distribusi Planck yang ditandai dengan Gambar 7 untuk temperatur tertentu dapat dijelaskan sebagai berikut:

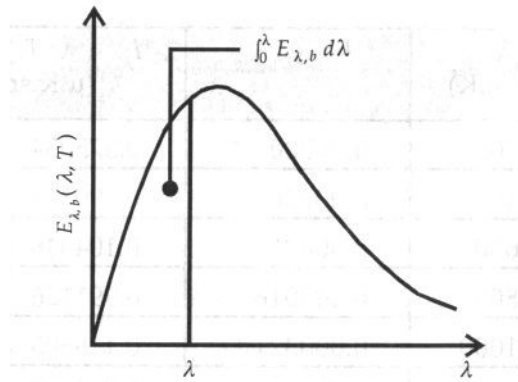
- Emisi radiasi berkelanjutan sesuai dengan panjang gelombang. Meningkatkan sesuai dengan peningkatan suhu.
- Bagian *spektral* di mana terdapat konsentrasi radiasi yang tergantung kepada temperatur, maka persamaan dengan peningkatan radiasi, panjang gelombang akan semakin pendek dan temperatur semakin meningkat.
- Fraksi penting matahari dihasilkan pada saat matahari mencapai kondisi benda hitam, yaitu pada temperatur 5800 K (fraksi ini merupakan fraksi yang dapat dilihat oleh mata manusia). Pada temperatur $T \leq 800$ K, emisi lebih banyak terjadi pada spektrum sinar infra merah dimana bagian ini tidak terlihat oleh mata.



Gambar 7. Hubungan antara panjang gelombang terhadap temperatur.

EMISI BAND

Fraksi total emisi benda hitam untuk temperatur tertentu digambarkan oleh perbandingan dari bagian yang dihitamkan terhadap luasan total di bawah kurva dari Gambar 8.

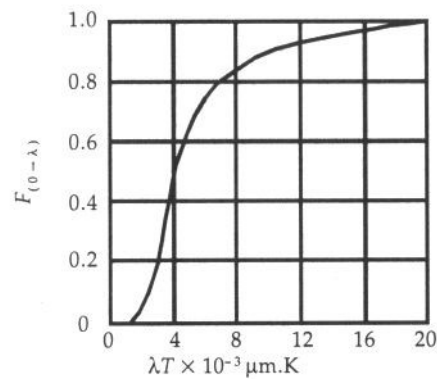


Gambar 8. Emisi radiasi dari benda hitam pada panjang gelombang $0 - \lambda$.

$$F_{(0 \rightarrow \lambda)} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{b\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{b\lambda} d\lambda}{\sigma T^4}$$

$$= \int_0^{\lambda T} \left(\frac{E_{b\lambda}}{\sigma T^5} \right) d(\lambda T) = f(\lambda T)$$

Nilai $F_{(0 \rightarrow \lambda)}$ bisa dilihat pada tabel 1, dan gambar 9.



Gambar 9. Fraksi dari total emisi benda hitam pada panjang gelombang $(0 - \lambda)$ sebagai fungsi λT .

Hasil yang diperoleh pada tabel 1 dapat dipergunakan untuk mendapatkan fraksi radiasi antara 2 panjang gelombang (λ_1 dan λ_2).

$$F_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)} = \frac{\int_0^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{b\lambda} d\lambda}{\sigma T^4}$$

$$= F_{(0 \rightarrow \lambda_2)} - F_{(0 \rightarrow \lambda_1)}$$

Tabel 11-1 Nilai $F_{(0-\lambda)}$ sebagai fungsi dari λT

λT ($\mu\text{m.K}$)	$F_{(0-\lambda)}$	$I_{\lambda,b}(\lambda, T) / \sigma T^5$ ($\mu\text{K.sr}$) ⁻¹	$I_{\lambda,b}(\lambda, T) / I_{\lambda,b}(\lambda_{\text{max}}, T)$
200	0,00000	0.375034×10^{-27}	0,00000
400	0,00000	0.490335×10^{-13}	0,00000
600	0,00000	0.104046×10^{-4}	0.000014
800	0.000016	0.991126×10^{-7}	0.001372
1000	0.000321	0.118505×10^{-5}	0.016406
1200	0.002134	0.523927×10^{-5}	0.072534
1400	0.007790	0.134411×10^{-4}	0.186082
1600	0.019718	0.249130	0.344904
1800	0.039341	0.375568	0.519949
2000	0.066728	0.493432	0.683123
2200	0.100888	0.589649×10^{-4}	0.816329
2400	0.140256	0.658866	0.912155
2600	0.183120	0.701292	0.970891
2800	0.227897	0.720239	0.997123

λT ($\mu\text{m}\cdot\text{K}$)	$F_{(0-\lambda)}$	$I_{\lambda,b}(\lambda, T)/\sigma T^5$ ($\mu\text{K}\cdot\text{sr}$) ⁻¹	$I_{\lambda,b}(\lambda, T)/I_{\lambda,b}(\lambda_{\text{max}}, T)$
2898	0.250108	0.722318×10^{-4}	1.000000
3000	0.273232	0.720254×10^{-4}	0.997143
3200	0.318102	0.705974	0.977373
3400	0.361735	0.681544	0.943551
3600	0.403607	0.650396	0.900429
3800	0.443382	0.615225	0.851737
4000	0.480877	0.578064	0.800291
4200	0.516014	0.540394×10^{-4}	0.748139
4400	0.548796	0.503235	0.696720
4600	0.579280	0.467343	0.647004
4800	0.607559	0.433109	0.599610
5000	0.633747	0.400813	0.554489
5200	0.658970	0.370580×10^{-4}	0.513043
5400	0.680360	0.342445	0.474092
5600	0.701046	0.316376	0.438002
5800	0.720158	0.292301	0.404671
6000	0.737818	0.270121	0.373965
6200	0.754140	0.249723×10^{-4}	0.345724
6400	0.769234	0.230985	0.319783
6600	0.783199	0.213786	0.295973
6800	0.796129	0.198808	0.274128
7000	0.808109	0.183534	0.242090
7200	0.819217	0.170256×10^{-4}	0.235708
7400	0.829527	0.158073	0.218842
7600	0.839102	0.146891	0.203360
7800	0.848005	0.136621	0.189143
8000	0.856288	0.127185	0.176079
8500	0.874608	0.106772×10^{-4}	0.147819
9000	0.890029	0.901463×10^{-4}	0.124801
9500	0.903085	0.765338	0.105956
10000	0.914199	0.653279	0.090442

λT ($\mu\text{m}\cdot\text{K}$)	$F_{(0-\lambda)}$	$I_{\lambda,b}(\lambda, T)/\sigma T^5$ ($\mu\text{K}\cdot\text{sr}$) ⁻¹	$I_{\lambda,b}(\lambda, T)/I_{\lambda,b}(\lambda_{\text{max}}, T)$
11000	0.931890	0.483321×10^{-5}	0.066913
10500	0.923710	0.560522	0.077600
11000	0.931890	0.483321×10^{-5}	0.066913
11500	0.939959	0.418725	0.057970
12000	0.945098	0.364394	0.050448
13000	0.955139	0.279457	0.038689
14000	0.962898	0.217641	0.030131
15000	0.969981	0.171866×10^{-5}	0.023794
16000	0.973814	0.137429	0.019026
18000	0.980860	0.908240×10^{-4}	0.012574
20000	0.985602	0.623310	0.008629
25000	0.992215	0.276474	0.003828
30000	0.995340	0.140469×10^{-6}	0.001945
40000	0.997967	0.473891×10^{-7}	0.000656
50000	0.998953	0.201605	0.000279
75000	0.999713	0.418597×10^{-8}	0.000058
100000	0.999905	0.135752	0.000019

IRRADIASI

Laju perpindahan panas radiasi per satuan panjang gelombang yang memasuki suatu luasan dA , dari arah \hat{s}_i pada sudut solid $d\Omega$:

$$I_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i)(\cos\theta_i dA) d\Omega_i$$

dimana pengertian intensitas di atas adalah laju perpindahan panas per satuan luas permukaan normal terhadap sinar datang dan per satuan sudut solid.

Laju perpindahan panas yang memasuki suatu permukaan jika dibagi dengan satuan luas permukaan dA dan per satuan sudut solid, ini disebut sebagai *spektral, directional* irradiasi,

$$H_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) \approx I_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) \cos \theta$$

Irradiasi adalah fluks kalor yang senantiasa menuju ke dalam suatu permukaan. Keseimbangan irradiasi diperoleh pada keadaan di mana:

$$H_{\lambda} = H_{\lambda \text{refleksi}} + H_{\lambda \text{absorpsi}} + H_{\lambda \text{transmisi}}$$

Spektral, hemispherical irradiasi adalah fluks kalor radiasi pada sebuah permukaan per satuan panjang gelombang dari semua arah yang mungkin.

$$H_{\lambda}(r, \lambda) = \int_0^{2\pi} H'_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) d\Omega_i = \int_0^{2\pi} I_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) \cos \theta_i d\Omega_i$$

Total, directional irradiasi adalah total irradiasi per satuan luas permukaan dan per satuan sudut solid pada seluruh panjang gelombang.

$$H'(r) = \int_0^{\infty} I_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) \cos \theta_i d\lambda$$

Total, hemispherical irradiasi adalah total irradiasi per satuan luas permukaan pada semua arah dan pada semua panjang gelombang pada spektrum yang ada:

$$H(r) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} I_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) \cos \theta_i d\Omega_i d\lambda$$

KARAKTERISTIK RADIASI DARI PERMUKAAN YANG BERLAKU SEPERTI BENDA HITAM

Emisi Permukaan

Sifat dari permukaan radiasi (emisivitas) didefinisikan sebagai perbandingan radiasi yang dihasilkan oleh permukaan radiasi terhadap radiasi yang dihasilkan oleh permukaan benda hitam pada temperatur yang sama. Nilai emisivitas bervariasi dari 0 sampai 1, dimana benda hitam mempunyai nilai emisivitas 1.

Directional emisivitas spektral $\epsilon'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T)$ dari permukaan pada temperatur T didefinisikan sebagai:

Perbandingan intensitas dari radiasi yang dihasilkan pada panjang gelombang λ dan arah (θ, φ) terhadap intensitas radiasi yang dihasilkan oleh benda hitam pada T dan λ yang sama.

$$\epsilon'_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T) = \frac{I_{e,\lambda}(\lambda, \theta, \varphi, T)}{I_{b,\lambda}(\lambda, T)}$$

Directional emisivitas total ϵ' dari permukaan pada temperatur T sebagai:

$$\epsilon'_\lambda(\theta, \varphi, T) = \frac{I_e(\theta, \varphi, T)}{I_b(T)}$$

Hemispherical emisivitas spektral ϵ_λ dari suatu permukaan pada temperatur T sebagai:

Perbandingan emisi radiasi yang dihasilkan pada panjang gelombang λ pada semua arah yang mungkin terhadap emisi radiasi yang dihasilkan oleh benda hitam pada T dan λ yang sama.

$$\epsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{E_\lambda(\lambda, T)}{E_{b,\lambda}(\lambda, T)}$$

Hubungan antara *spektral, hemispherical* emisivitas dengan *spektral, directional hemispherical* dapat ditunjukkan dengan persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned} \epsilon_\lambda(\lambda, T) &= \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_\lambda(T, \lambda, \theta, \varphi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi}{\pi I_{b,\lambda}(T, \lambda)} \\ &= \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \epsilon_\lambda(T, \lambda, \theta, \varphi) I_{b\lambda} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi}{\pi I_{b,\lambda}(T, \lambda)} \end{aligned}$$

atau

$$\epsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \epsilon_{\lambda}(T, \lambda, \theta, \varphi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi$$

Hemispherical emisivitas total ϵ_{λ} dari suatu permukaan pada temperatur T didefinisikan sebagai:

Perbandingan emisi radiasi yang dihasilkan dari rata-rata semua panjang gelombang, pada semua arah yang mungkin terhadap emisi radiasi yang dihasilkan oleh benda hitam pada T yang sama.

$$\epsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)}$$

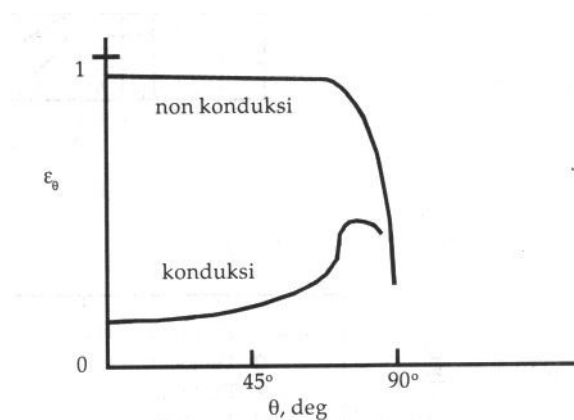
atau

$$\epsilon(T) = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda}(\lambda, T) E_{b,\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{E_b(T)}$$

Perhitungan untuk mendapatkan nilai emisivitas suatu permukaan pada berbagai material yang dilapisi dapat dilakukan dengan eksperimen.

Directional emisivitas yang bersifat *diffuse* nilainya adalah konstan, tidak tergantung arah. Nilai ini sering digunakan sebagai pendekatan terhadap nilai emisivitas dari berbagai permukaan.

Variasi dari nilai *directional emisivitas* ϵ_{θ} dengan θ ditunjukkan oleh Gambar 10, untuk material yang bersifat konduksi dan non konduksi.



Gambar 10. Hubungan antara nilai emisivitas spektral benda konduksi atau non-

konduksi terhadap θ .

Absorpsivitas (Penyerapan)

Absorpsivitas adalah proses pada saat permukaan menerima radiasi energi diserap oleh permukaan tersebut. Akibat langsung dari proses penyerapan ini dapat dirasakan dengan terjadinya peningkatan energi dari dalam medium yang terkena proses tersebut.

Spektral directional absorpsivitas α'_λ pada permukaan (pada lokasi r) didefinisikan sebagai:

$$\alpha'_\lambda(r, \lambda, \hat{S}_i) = \frac{H'_{\lambda ab}}{H'_\lambda}$$

Jika kesetimbangan termodinamika lokal dapat diatasi, *spektral directional absorpsivitas* adalah benar-benar menjadi sifat permukaan yang nilainya sama dengan *spektral directional emisivitas*.

$$\alpha'_\lambda(T, \lambda, \theta, \varphi) = \epsilon'_\lambda(T, \lambda, \theta, \varphi)$$

Spektral hemispherical absorpsivitas pada permukaan (pada lokasi r) dirumuskan:

$$\alpha'_\lambda(r, \lambda) = \frac{H'_{\lambda ab}}{H'_\lambda} = \frac{\int \alpha'_\lambda(T, \lambda, \hat{S}_i) I_\lambda(r, \lambda, \hat{S}_i) \cos \theta_i d\Omega_i}{\int_{2\pi} I_\lambda(r, \lambda, \hat{S}_i) \cos \theta_i d\Omega_i}$$

Jika radiasi yang datang bersifat *diffuse* maka diperoleh:

$$\alpha_\lambda(T, \lambda) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha'_\lambda(T, \lambda, \theta_i, \varphi) \cos \theta_i \sin \theta_i d\varphi_i$$

Dari persamaan-persamaan di atas diperoleh:

$$\alpha_\lambda(T, \lambda) = \epsilon_\lambda(T, \lambda)$$

Directional absorpsivitas total pada suatu permukaan didefinisikan melalui persamaan:

$$\alpha'(r, \hat{s}_i) = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(T, \lambda, \hat{s}_i) I_{\lambda}(r, \hat{s}_i) d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda}(r, \hat{s}_i) d\lambda}$$

Directional absorpsivitas total akan sama nilainya dengan directional emisivitas total jika radiasi yang datang bersifat kelabu dan berada pada temperatur lokal yang sama.

Hemispherical absorpsivitas total pada sebuah permukaan dapat didefinisikan dari persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \alpha'(r) &= \frac{H'_{\lambda ab}}{H} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(r, \lambda) H_{\lambda}(r, \lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} H_{\lambda}(r, \lambda) d\lambda} \\ &= \frac{\int_0^{\infty} \int_{2\pi} \alpha_{\lambda}(T, \lambda, \hat{S}_i) I_{\lambda}(r, \lambda, \hat{S}_i) \cos \theta_i d\Omega_i d\lambda}{\int_0^{\infty} \int_{2\pi} \cos \theta_i d\Omega_i d\lambda} \end{aligned}$$

Directional absorpsivitas hemispherical total dan emisivitas akan sama hanya untuk permukaan yang bersifat diffuse, dan kelabu atau irradiasi (insiden radiasi) berasal dari permukaan hitam pada temperatur yang sama.

Refleksivitas (Pemantulan)

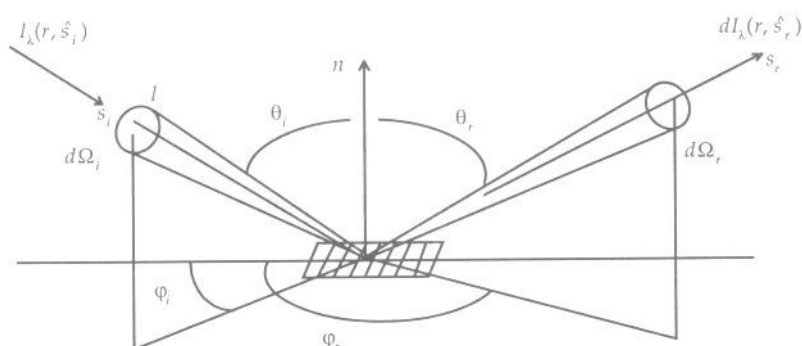
Refleksivitas dari suatu permukaan tergantung kepada dua arah, yaitu arah datang irradiasi s^{\wedge}_1 dan arah dari energi yang dipantulkan ξ_r . sehingga kita mengenal sifat *bidirectional*.

Fluks kalor per satuan panjang gelombang yang memasuki suatu luasan permukaan dA dari arah \hat{s}_i dan sudut solid $d\Omega_i$ dapat ditulis sebagai berikut:

$$H'_{\lambda} d\Omega_i = I_{\lambda}(r, \lambda, s_i) \cos \theta_i d\Omega_i$$

Dari persamaan di atas, sejumlah fraksi α'_λ akan diserap oleh permukaan dan akan ada yang dipantulkan pada semua arah yang mungkin. Fraksi yang dipantulkan kita beri tanda sebagai $\rho''_\lambda(r, \lambda, \hat{s}_i, \hat{s}_r) d\Omega_i$, sehingga jumlah energi yang dipantulkan pada arah $d\Omega_i$ sebagai:

$$dI_\lambda(r, \lambda, \hat{s}_r) d\Omega_r = (H'_\lambda d\Omega_i) \rho''_\lambda(r, \lambda, \hat{s}_i, \hat{s}_r) d\Omega_i$$



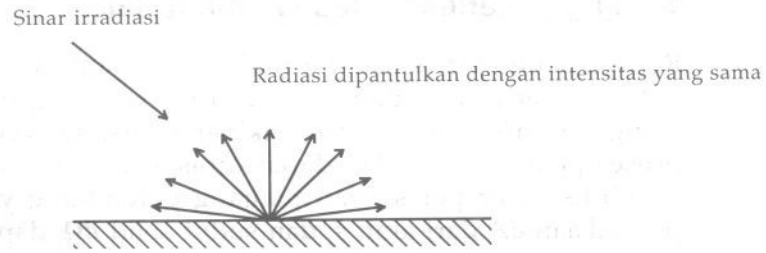
Gambar 13. Fungsi pemantulan bidirectional.

Spectral bidirectional refleksi $\rho''_\lambda(r, \lambda, \hat{s}_i, \hat{s}_r)$ dapat didefinisikan dari persamaan berikut:

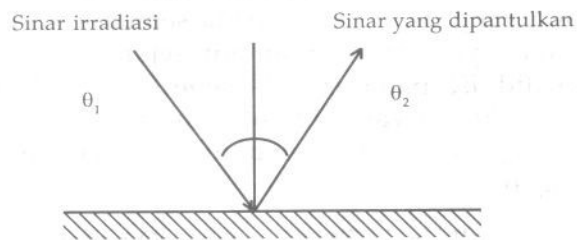
$$\rho''_\lambda(r, \lambda, \hat{s}_r) = \frac{dI_\lambda(r, \lambda, \hat{s}_i, \hat{s}_r)}{I_\lambda(r, \lambda, \hat{s}) \cos \theta_i d\Omega_i}$$

Pemantulan dibagi dua yaitu pemantulan *specular* dan pemantulan *diffuse*. Pemantulan *diffuse* jika arah dari irradiasi tidak diperdulikan, intensitas radiasi yang dipantulkan tidak tergantung dari sudut pantul (radiasi dipantulkan dengan intensitas sama ke segala arah). Sedangkan pemantulan *specular* yaitu jika arah dari sudut irradiasi sama dengan arah sudut pantul.

Permukaan halus akan bersifat *specular* daripada permukaan kasar, sedangkan permukaan kasar akan lebih bersifat *diffuse* daripada permukaan halus.



Gambar 14. Refleksi diffuse.



Gambar 15. Refleksi Specular.

Bidirectional reflektivitas total :

$$\rho'_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i, \hat{s}_r) = \frac{\int_0^{\infty} \rho'_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i, \hat{s}_r) I_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) d\lambda}$$

Directional hemispherical reflektivitas total:

$$\hat{\rho}'_{\lambda}(r, \hat{s}_i) = \frac{\int_0^{\infty} \hat{\rho}'_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) I_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) d\lambda}$$

Hemispherical – directional reflektivitas total:

$$\rho^{\Delta'}(r, \hat{s}_r) = \frac{\int_0^{\infty} \rho^{\Delta'}_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_r) \int_{2\pi} I_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) \cos \theta_i d \Omega_i d \lambda}{\int_0^{\infty} \int_{2\pi} I_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) \cos \theta_i d \Omega_i d \lambda}$$

Hemisphere reflektivitas total:

$$\rho(r, \hat{s}_r) = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda}(r, \lambda) \int_{2\pi} I_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) \cos \theta_i d \Omega_i d \lambda}{\int_0^{\infty} \int_{2\pi} I_{\lambda}(r, \lambda, \hat{s}_i) \cos \theta_i d \Omega_i d \lambda}$$

Transmisivitas

Transmisivitas adalah fraksi dari jumlah energi radiasi yang ditransmisikan per jumlah total energi radiasi yang diterima suatu permukaan.

Transmisivitas selain merupakan fungsi temperatur dan panjang gelombang juga bergantung pada arah datang dan perginya sinar irradiasi.

Hemispherical transmisivitas spektral dapat didefinisikan melalui persamaan:

$$\tau_{\lambda} = \frac{H_{\lambda, tr}(\lambda)}{H_{\lambda}(\lambda)}$$

Hemispherical transmisivitas total :

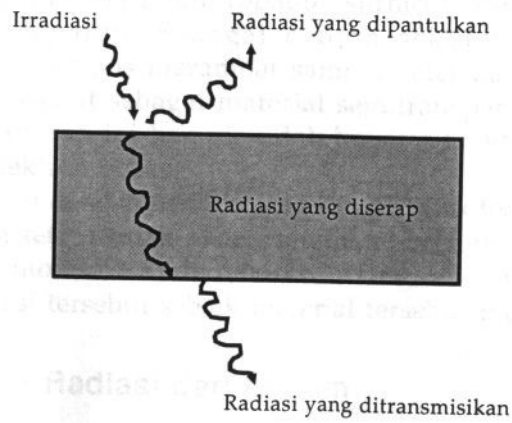
$$\tau = \frac{H_{tr}}{H}$$

Hubungan antara *Hemispherical transmisivitas total* dengan *Hemispherical transmisivitas spektral*:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} H_{\lambda,r}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} H_r(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} H_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} H_{\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

Jika suatu permukaan yang mendapatkan sinar irradiasi, dan selama permukaan tersebut dapat menyerap, memantulkan dan mentransmisikan sinar yang datang, maka jumlah dari fraksi ketiga sifat tersebut harus sama dengan satu.

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$



Gambar 16. Proses penyerapan, pemantulan dan transmisi oleh sebuah permukaan.