



BAB III

RADIASI

Tujuan Umum:

- Mampu menjelaskan pengertian radiasi
- Mampu menjelaskan pengertian daya emisi
- Mampu menjelaskan radiasi pada benda hitam
- Mampu menjelaskan efek kuadrat jarak
- Mampu menjelaskan hubungan antara faktor bentuk radiasi
- Menghitung laju perpindahan panas untuk benda non hitam
- Menghitung laju perpindahan panas radiasi ke bahan semi transparan
- Menerapkan persamaan radiasi pada didih film dalam perhitungan

Tujuan Khusus:

- Mampu menerapkan hukum radiasi benda hitam dalam menyelesaikan masalah
- Mampu menerapkan persamaan radiasi antara dua permukaan dalam perhitungan
- Mampu menerapkan faktor bentuk radiasi dalam menyelesaikan masalah radiasi
- Mampu menghitung jumlah perpindahan panas untuk benda non hitam
- Mampu menghitung jumlah perpindahan panas radiasi ke bahan semi transparan
- Mampu menerapkan persamaan radiasi pada didih film dalam perhitungan

4.1 Pengertian Radiasi

Radiasi bergerak di ruang sebagai garis atau berkas cahaya dan hanya benda-benda yang dapat terlihat oleh benda yang melakukan radiasi itu saja yang dapat menangkap radiasi benda itu. Dalam kenyataan radiasi yang dipantulkan akan menimpa benda-benda lain yang menyerap dan akhirnya akan dikonversikan menjadi kalor, setelah beberapa pemantulan.

Benda-benda yang kena radiasi, meradiasi energy yang energinya terdiri dari foton-foton yang bergerak dengan arah, fasa dan frekuensi yang serampangan. Foton-foton tersebut ada yang diserap, direfleksi atau diteruskan melalui permukaan tersebut. Tiga sifat permukaan yang mengukur kuantitas-kuantitas tersebut adalah:

- Absorptivitas (keteserapan), α adalah bagian radiasi yang diserap oleh bahan
- Reflektivitas (keterpantulan), ρ adalah bagian radiasi yang direfleksikan oleh bahan
- Transmisivitas, τ adalah bagian radiasi yang ditransmisikan oleh bahan

Jumlah ketiga fraksi adalah satu, yakni:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (4.1)$$

4.1.1 Daya Emisi

Energi monokromatik yang dipancarkan oleh permukaan yang melakukan radiasi tergantung pada temperature permukaan selain panjang gelombang radiasi. Radiasi monokromatik yang dipancarkan tiap satuan luas persatuhan waktu per panjang gelombang didefinisikan sebagai daya radiasi monokromatik (W_λ), jadi daya radiasi total W adalah jumlah semua radiasi monokromatik dari permukaan tersebut. Hubungan persamaan matematisnya adalah:

$$W = W_\lambda \times \epsilon \quad (4.2)$$

4.1.2 Radiasi Benda Hitam

Benda-benda nyata bukan merupakan benda hitam dan hanya meradiasikan energy lebih sedikit dari benda hitam. Untuk memperhitungkan hal tersebut harus diefinsikan emisivitas (ϵ) dalam daya radiasi benda nyata dan benda hitam yang dihitung pada temperature yang sama. Perbandingan daya radiasi total benda (W) terhadap daya radiasi total benda hitam(W_b) didefinisikan sebagai daya benda tersebut, yang besarnya:

$$\epsilon = \frac{W}{W_b} \quad (4.3)$$

Perbandingan antara daya radiasi monokromatik benda dengan daya radiasi monokromatik benda hitam disebut emisivitas monokromatik yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\epsilon_\lambda = \frac{W_\lambda}{W_{b,\lambda}} \quad (4.4)$$

4.2 Hukum-Hukum Radiasi Benda Hitam

Fluks radiasi panas dari sebuah permukaan benda hitam disebut daya radiasi(W) dikemukakan oleh Stefan Boltzmann. Pertimbangan termodinamika memperlihatkan bahwa W adalah sebanding dengan pangkat empat dari temperature mutlak. Jadi total radiasi yang diradiasikan oleh benda hitam:

$$W_b = \sigma \times T^4 \quad (4.5)$$

Dimana:

W_b	= Total energy radiasi, W/m^2
σ	= tetapan Stefan Boltzmann
	= $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
	= $0,1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/jam ft}^2 \text{ R}^4$

T = temperature absolute, K atau R

4.2.1 Hukum Planck

Jika didistribusikan dalam spectrum benda hitam, daya emisivitas monokromatik benda hitam diberikan oleh Hukum Planck sebagai berikut:

$$W_{b,\lambda} = \frac{2\pi h c^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1} \quad (4.6)$$

Dimana:

- $W_{b,\lambda}$ = daya emisi monokromatik benda hitam, W/m^2
- h = tetapan Planck
- c = kecepatan cahaya
- λ = panjang gelombang radiasi
- k = tetapan Stefan Boltzmann
- T = temperatur absolute

Persamaan (4.6) dapat juga dituliskan sebagai berikut:

$$W_{b,\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_1}{\lambda T}} - 1} \quad (4.7)$$

C_1 , dan C_2 adalah tetapan

4.2.2 Hukum Wien

Pada temperature tertentu, daya radiasi monokromatik mempunyai harga maksimum, untuk gelombang(λ_{maks}). Besarnya λ_{maks} berbanding terbalik dengan temperature absolute yang didefinisikan oleh Hukum Wien sebagai berikut:

$$T \times \lambda_{\text{maks}} = C \quad (4.8)$$

Dimana:

$$C = 2890 \text{ bila } \lambda \text{ diukur dalam T Kelvin}$$

$$C = 5200 \text{ bila } \lambda \text{ diukur dalam T Rankine}$$

Contoh Soal 4.1:

Radiasi sinar mengenai benda hitam, dengan gelombang radiasi maksimum adalah $\lambda_{\text{maks}} = 0,5$ mikrons.

- Tentukan temperature permukaan matahari!
- Hitung fluks panas pada permukaan matahari!

Penyelesaian:

- Memakai hukum Wien

$$T \times \lambda_{\text{maks}} = C \longrightarrow T = \frac{0,2890}{\lambda_{\text{maks}}} = \frac{0,2890 \text{ cm K}}{0,5 \times 10^{-4} \text{ cm}} = 5780 \text{ K} = 10404 \text{ R}$$

- Memakai hukum Stefan Boltzmann

$$\frac{q_b}{A} = \sigma T^4 = 0,1714 \times 10^{-8} \times 10404^4 = 2,01 \times 10^7 \text{ Btu/jam ft}^2$$

4.2.3 Hukum Kirchoff

Untuk radiasi suatu bahan, perbandingan daya radiasi total benda terhadap keterserapan benda itu hanya tergantung pada temperature benda tersebut bila benda pada temperature kesetimbangan. Pernyataan tersebut dikemukakan oleh Hukum Kirchoff sebagai berikut:

$$\frac{W_1}{\alpha_1} = \frac{W_2}{\alpha_2} \quad (4.9)$$

W_1 , W_2 adalah daya radiasi masing-masing benda

α_1, α_2 adalah keteserapan masing-masing benda

Jika benda pertama adalah benda hitam ($\alpha = 1$) maka:

$$W_1 = W_b = \frac{W_2}{\alpha_2} \quad (4.10)$$

W_b adalah daya radiasi total benda hitam

Persamaan (4.10) bias dituliskan sebagai berikut:

$$\alpha_2 = \frac{W_2}{W_b} \quad (4.11)$$

Persamaan (4.11) jika dihubungkan dengan emisivitas (persamaan 4.3) maka:

$$\epsilon_2 = \alpha_2 \times \frac{W_2}{W_b} \quad (4.12)$$

Untuk permukaan logam yang dilapisi, keteserapan α_2 meningkat bersamaan dengan temperature absolute, juga temperature permukaan T_2 . Hubungan persamaan matematisnya:

$$\alpha_2 = k_1 \sqrt{T_1 \times T_2} \quad (4.13)$$

Dimana:

k_1 = tetapan

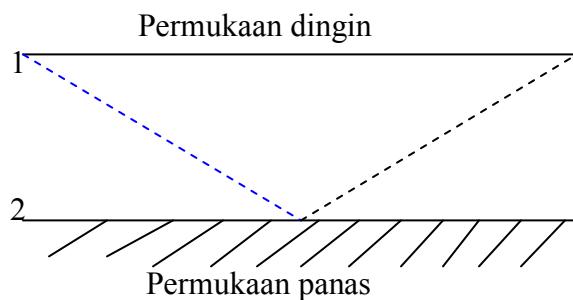
T_1 = temperature permukaan pertama

T_2 = temperature permukaan kedua

4.3 Radiasi Antara Dua Permukaan

Hubungan radiasi total terhadap benda buram dengan luas A , emisivitas ϵ dan temperature absolute T adalah:

$$\frac{q}{A} = \sigma \times \epsilon \times T^4 \quad (4.14)$$



Gambar 4.1 Dua bidang datar sejajar

Untuk dua permukaan yang sejajar, sangat luas dan ada lintasan pada kedua permukaan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1, fungsi yang diradiasikan oleh bidang pertama adalah σT_1 . Seluruh radiasi setiap permukaan itu jatuh pada permukaan yang satu lagi dan diserap seluruhnya. Oleh sebab itu, kehilangan panas

neto dari permukaan pertama dan energy neto yang ditambahkan pada bidang datar kedua (untuk $T_1 > T_2$) menjadi $\sigma T_1^4 - \sigma T_2^4$ atau $\sigma(T_1^4 - T_2^4)$. Dengan demikian, persamaan (4.14) menjadi:

$$\frac{q}{A} = \sigma \times \epsilon \times (T_1^4 - T_2^4) \quad (4.15)$$

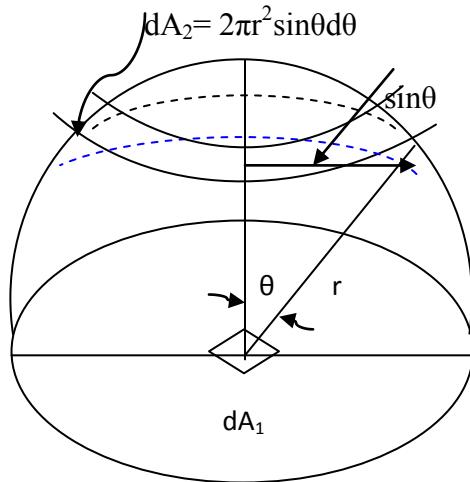
Contoh Soal 4.2:

Tabung horizontal dari logam mempunyai diameter luar (OD) 0,0254 m dan panjang 0,65 m dengan temperature permukaan 593 K diletakkan dalam dapur yang sangat luas yang berdinding batu bata tahan api. Tabung dikelilingi udara yang bertemperatur 1095 K. Emisivitas tabung logam adalah 0,7 pada temperature 1095 dan 0,5 pada temperature 593 K. Hitung laju perpindahan panas radiasi untuk tabung!

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} A_1 &= \pi d L = [3,14 \times 0,0254 \times 0,65] \text{m}^2 = 0,0518 \text{ m}^2 \\ q &= A_1 \times \sigma \times \epsilon \times (T_1^4 - T_2^4) \\ &= 0,0518 \times 0,6 \times 5,669 \times 10^{-8} [(1095^4 - 593^4)] \\ &= 2,31 \times 10^3 \text{ W} \end{aligned}$$

4.4 Efek Kuadrat Jarak



Gambar 4.2 Elemen pemancar

Dari elemen pemancar di atas, permukaan dA_1 terletak di pusat permukaan A_2 yang berbentuk setengah bola dengan jari-jari r . Elemen yang berbentuk cincin pada permukaan penerima dA_2 mempunyai luas $2\pi r^2 \sin\theta d\theta$ adalah sudut antara garis normal terhadap dA_1 dengan jari-jari yang menghubungkan dA_1 dan dA_2 . Pada gambar 4.2 ditunjukkan bahwa intensitas radiasi I (laju perpindahan panas persatuan luas permukaan) pada titik yang terletak diatas dA_1 adalah dI_o dan pada titik-titik diatas dA_1 adalah dI . Hubungan persamaan menurut Hukum Cosinus:

$$dI = dI_o \cos \theta \quad (4.16)$$

Laju penerimaan panas oleh elemen luas dA_2 , $dqdA_2$ adalah:

$$dqdA_2 = dI_o dA_2 = dI_o \cos \theta dA_2 \quad (4.17)$$

karena $dA_2 = 2\pi r^2 \sin \theta \cos \theta d\theta$, maka persamaan (4.17) menjadi:

$$dqdA_2 = dI_o 2\pi r^2 \sin \theta \cos \theta d\theta \quad (4.18)$$

Integrasi persamaan (4.18) diperoleh:

$$\begin{aligned} \int_{A_2}^{2\pi/2} dqdA_2 &= \int_0^{2\pi/2} dI_o 2\pi r^2 \sin \theta \cos \theta d\theta \\ &= \pi dI_o r^2 \end{aligned} \quad (4.19)$$

Karena laju emisi dari luas dA_1 adalah dengan laju penerima panas oleh luas total A_2 dan karena semua radiasi dari dA_1 pasti menimpa suatu bagian A_2 , maka:

$$\int_{A_2}^{2\pi/2} dqdA_2 = W_1 dA_1 = \pi dI_o r^2 \quad (4.20)$$

Atau

$$dI_o = \frac{W_1}{\pi r^2} dA_1 \quad (4.21)$$

Dari persamaan (4.21) dan (4.16) diperoleh:

$$dI = \frac{W_1}{\pi r^2} dA_1 \cos \theta \quad (4.22)$$

Karena garis penghubung tidak normal terhadap dA_2 sehingga laju penerimaan panas oleh elemen dA_2 yang berasal dari radiasi dA_1 adalah:

$$dq dA_1 dA_2 = dI_1 \cos \theta_2 dA_2 \quad (4.23)$$

dA_1 adalah elemen hitam maka persamaan (4.23) menjadi:

$$\begin{aligned} dq dA_1 dA_2 &= \frac{W_1}{\pi r^2} dA_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_2 \\ &= \frac{\sigma T_1^4}{\pi r^2} \cos \theta_2 dA_1 dA_2 \end{aligned} \quad (4.24)$$

Demikian juga radiasi dA_2 yang menimpa dA_1 :

$$dq dA_1 dA_2 = \frac{\sigma T_1^4}{\pi r^2} \cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_1 dA_2 \quad (4.25)$$

Untuk laju perpindahan panas dq_{12} antara kedua elemen:

$$dq_{12} = \frac{\sigma \cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_1 dA_2}{\pi r^2} \times (T_1^4 - T_2^4) \quad (4.26)$$

4.5 Faktor Bentuk Radiasi

Faktor bentuk radiasi didefinisikan sebagai:

- F_{1-2} = bagian atau pecahan energy atau kalor yang meninggalkan permukaan 1 mencapai permukaan 2
- F_{2-1} = bagian atau pecahan energy atau kalor yang meninggalkan permukaan 2 mencapai permukaan 1
- F_{m-n} = bagian atau pecahan energy atau kalor yang meninggalkan permukaan m mencapai permukaan n

Energi yang meninggalkan permukaan 1 dan mencapai permukaan 2:

$$Wb_1 \times A_1 \times F_{1-2}$$

Energi yang meninggalkan permukaan 2 dan mencapai permukaan 1:

$$Wb_2 \times A_2 \times F_{2-1}$$

Bila A_1 dan A_2 adalah benda hitam, semua energy radiasi akan diserap dan "energy netonya":

$$Wb_1 \times A_1 \times F_{1-2} - Wb_2 \times A_2 \times F_{2-1} = q_{1-2}$$

Bila temperature keduanya sama:

$$q_{1-2} = 0 \text{ atau } Wb_1 = Wb_2$$

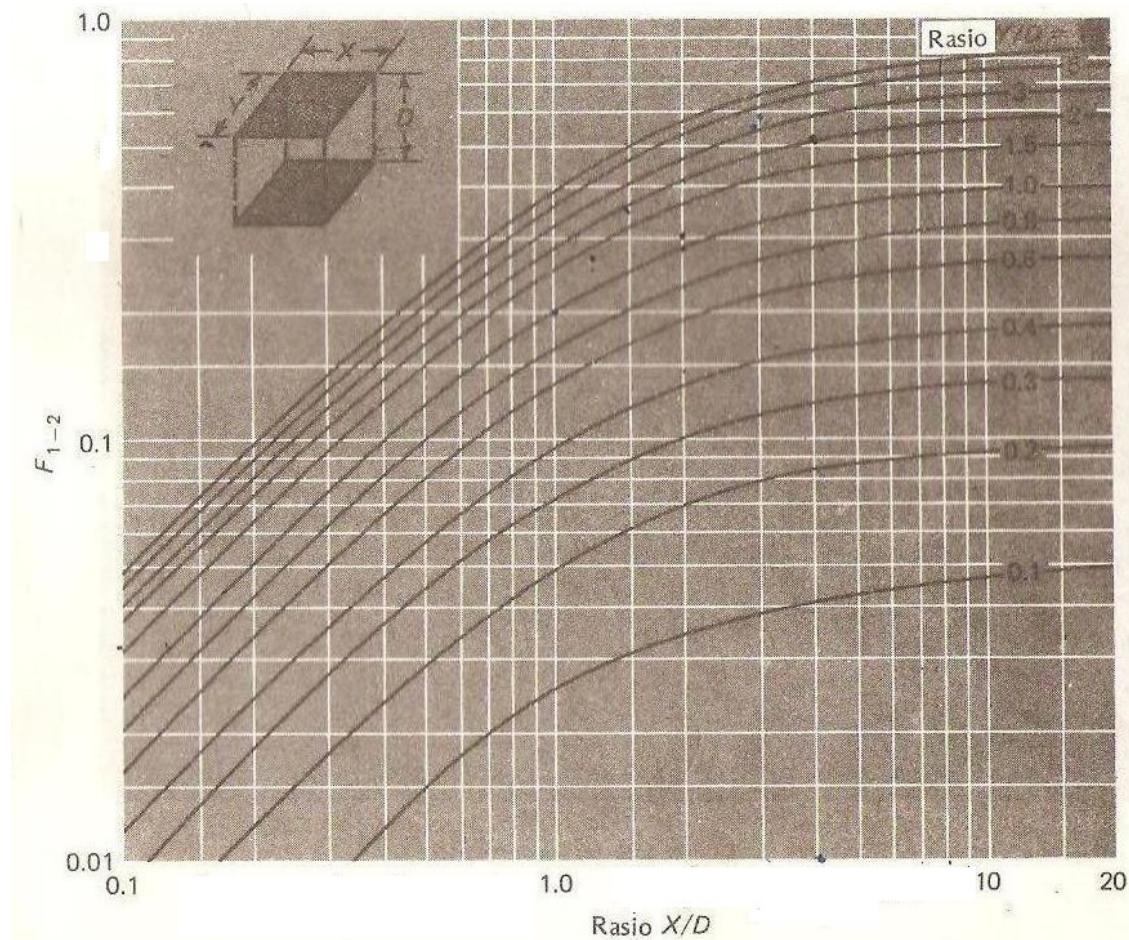
$$A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1}$$

Maka beda energy menjadi:

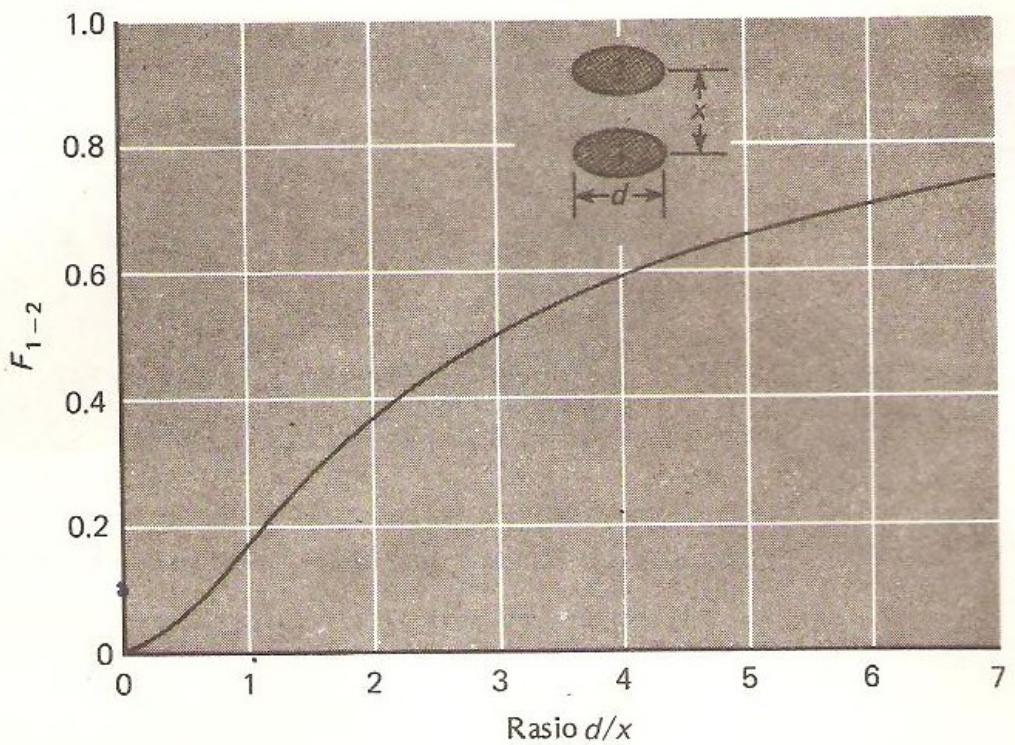
$$q_{1-2} = A_1 F_{1-2} (Wb_1 - Wb_2) \quad (4.28)$$

$$q_{1-2} = A_1 F_{1-2} (\sigma \times T^4_1 - \sigma \times T^4_2)$$

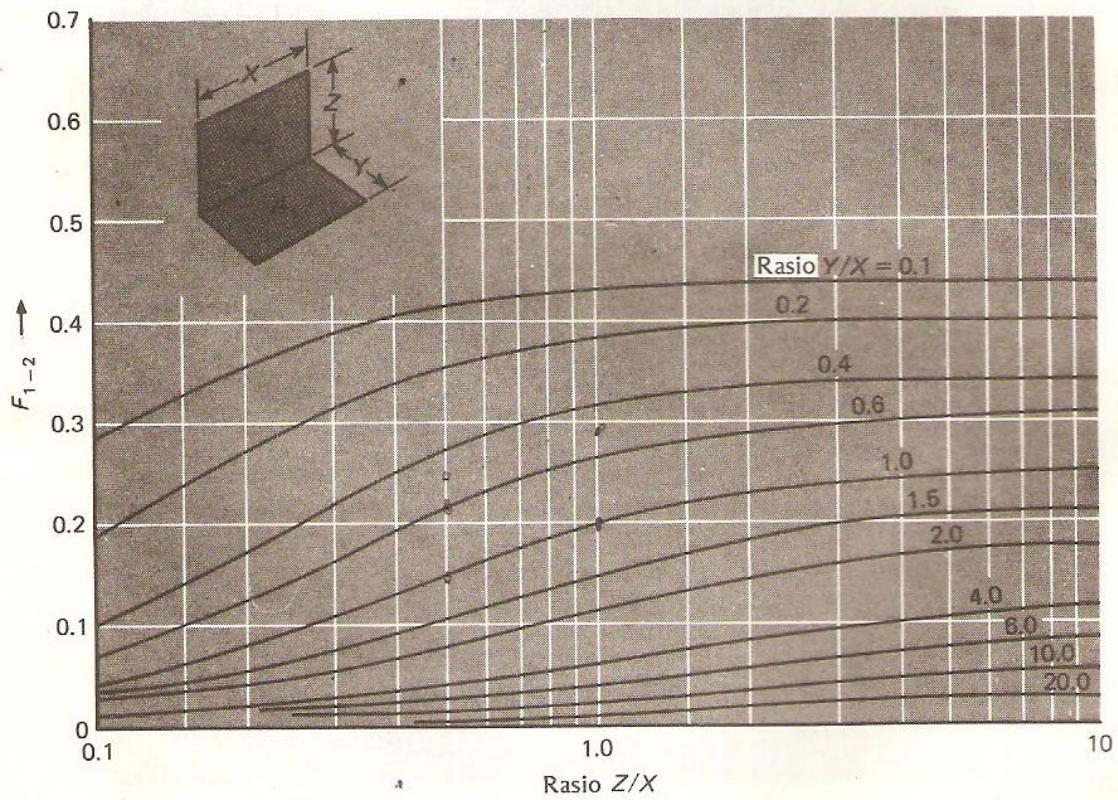
$$q_{1-2} = A_1 F_{1-2} \sigma [T^4_1 - T^4_2]$$



Gambar 4.3 Faktor bentuk radiasi antara segi empat tegak lurus dengan ujungnya



Gambar 4.4 Faktor bentuk radiasi antara cakram paralel

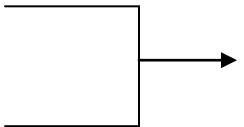


Gambar 4.5 Faktor bentuk radiasi antara segi empat paralel

Contoh Soal 4.3:

Dua buah plat parallel dengan ukuran sama yaitu 0,5 m x 1 m berjarak 0,5 m. Plat yang satu dipertahankan pada temperature 1015°C dan plat yang lain dipertahankan pada 505°C. Berapa beda panas radiasi di antara 2 plat tersebut?

Penyelesaian:

$$\frac{Y}{D} = \frac{0,5}{0,5} = 1$$


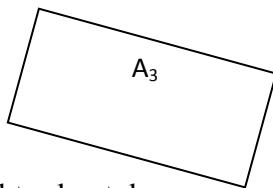
Dari gambar (4.3) diperoleh $F_{1-2} = 0,285$

$$\frac{X}{D} = \frac{1}{0,5} = 2$$

$$\begin{aligned} q_{1-2} &= A_1 F_{1-2} (Wb_1 - Wb_2) \\ &= \sigma A_1 F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4) \\ &= 5,669 \times 10^{-8} \times 0,5 \times 0,285 [(1015+273)^4 - (505 + 273)^4] \\ &= 19,27 \text{ kW} \end{aligned}$$

4.5.1 Hubungan Antara Faktor-Faktor Bentuk

Perhatikan gambar 4.6:



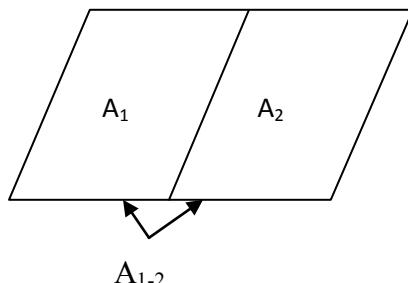
Gambar 4.6 Faktor bentuk

Faktor bentuk untuk radiasi dari A_3 ke kombinasi luas A_{1-2} diperoleh:

$$F_{3-1,2} = F_{3-1} + F_{3-2} \quad (4.30)$$

Atau

$$A_3 F_{3-1,2} = A_3 F_{3-1} + A_3 F_{3-2}$$

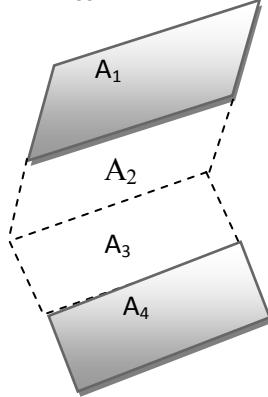


Gambar 4.7 Hubungan antara dua faktor bentuk

$$\begin{aligned}
 A_3 F_{3-1,2} &= A_{1-2} F_{3-1} + A_3 F_{3-2} \\
 A_3 F_{3-1} &= A_1 F_{2-3} \\
 A_3 F_{3-2} &= A_2 F_{2-3} \\
 A_{1-2} F_{1,2,3,4} &= A_1 F_{1-3,4} + A_2 F_{2-3,4} \tag{4.31}
 \end{aligned}$$

Atau

$$\begin{aligned}
 A_1 F_{1-3,4} &= A_{1-2} F_{1-3} + A_1 F_{1-4} \\
 A_{1-2} F_{1,2,3} &= A_1 F_{1-3} + A_2 F_{2-3} \\
 F_{11} = F_{22} = F_{33} = F_{44} &= 0
 \end{aligned}$$



Gambar 4.8 Hubungan antara beberapa faktor bentuk

4.6 Perpindahan Panas Antara Benda Hitam Dengan Non-Hitam

Ada dua macam perpindahan antar benda non-hitam, yakni:

- Irradiasi (G) adalah total radiasi yang terjadi pada persatuhan waktu persatuhan luas.
- Radiosity (J) adalah total radiasi yang meninggalkan permukaan persatuhan waktu persatuhan luas.

Persamaan hubungan antara irradiasi dengan radiosity adalah:

$$J = \epsilon W_b + \rho G \tag{4.32}$$

Diketahui bahwa $\rho = 1 - \alpha = 1 - \epsilon$, sehingga persamaan (4.32) menjadi:

$$\begin{aligned}
 J &= \epsilon W_b + (1 - \epsilon)G \quad \text{atau} \\
 G &= \frac{J - \epsilon W_b}{(1 - \epsilon)} \tag{4.33}
 \end{aligned}$$

Energi neto yang meninggalkan permukaan adalah perbedaan antara radiosity dan irradiasi:

$$\frac{q}{A} = J - G = J - \frac{J - \epsilon W_b}{1 - \epsilon} \tag{4.34}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{J - J\epsilon - J + \epsilon W_b}{1 - \epsilon} = \frac{\epsilon (W_b - J)}{1 - \epsilon} \\
 &\text{Atau} \\
 q &= \frac{W_b - J}{(1 - \epsilon)/\epsilon A} \tag{4.34}
 \end{aligned}$$