

PERPINDAHAN PANAS (HEAT TRANSFER)

Lugman Buchori, ST, MT

Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik
UNDIP Semarang

REFERENSI

1. Kern, D.Q., “**Process Heat Transfer**”, International Student Edition, McGraw Hill Kogakusha, Ltd., New York.
2. Holman, J.P., “**Heat Transfer**”, sixth edition, McGraw Hill, Ltd., New York, 1986.
3. Mikheyev, M., “**Fundamentals of Heat Transfer**”, John Willey & Sons Inc., New York, 1986.
4. Incopera De Witt, “**Fundamentals of Heat Transfer**”, John Willey & Sons Inc., New York, 1981.
5. Ozisik, “**Heat Transfer, a basic approach**”, 1984.
6. McAdams, W.H., “**Heat Transmision**”, 3rd edition, McGraw Hill Book Company, Inc., New York.

MATERI KULIAH

1. Dasar-dasar perpindahan panas (Konduksi, Konveksi, Radiasi).
2. Aplikasi perpindahan panas dalam Industri

Dasar-dasar mempelajari perpindahan panas:

- Persamaan differensial biasa/parsial
- Mekanika fluida
- Konsep neraca energi thermodinamika

Definisi :

Ilmu yang mempelajari tentang laju perpindahan panas diantara material/benda karena adanya perbedaan suhu (panas dan dingin)

Panas akan mengalir dari tempat yang suhunya tinggi ke tempat yang suhunya lebih rendah

KEGUNAAN ILMU PERPINDAHAN PANAS

- ↻ Untuk merencanakan alat-alat penukar panas (heat exchanger).
- ↻ Untuk menghitung kebutuhan media pemanas/ pendingin pada suatu reboiler atau kondensor dalam kolom destilasi.
- ↻ Untuk perhitungan furnace/dapur. → radiasi
- ↻ Untuk perancangan ketel uap/boiler.
- ↻ Untuk perancangan alat-alat penguap (evaporator).
- ↻ Untuk perancangan reaktor kimia
 - Eksotermis → butuh pendingin
 - Endotermis → butuh pemanas

MEKANISME PERPINDAHAN PANAS

- 1. Konduksi (hantaran)**
- 2. Konveksi**
- 3. Radiasi (sinaran)**

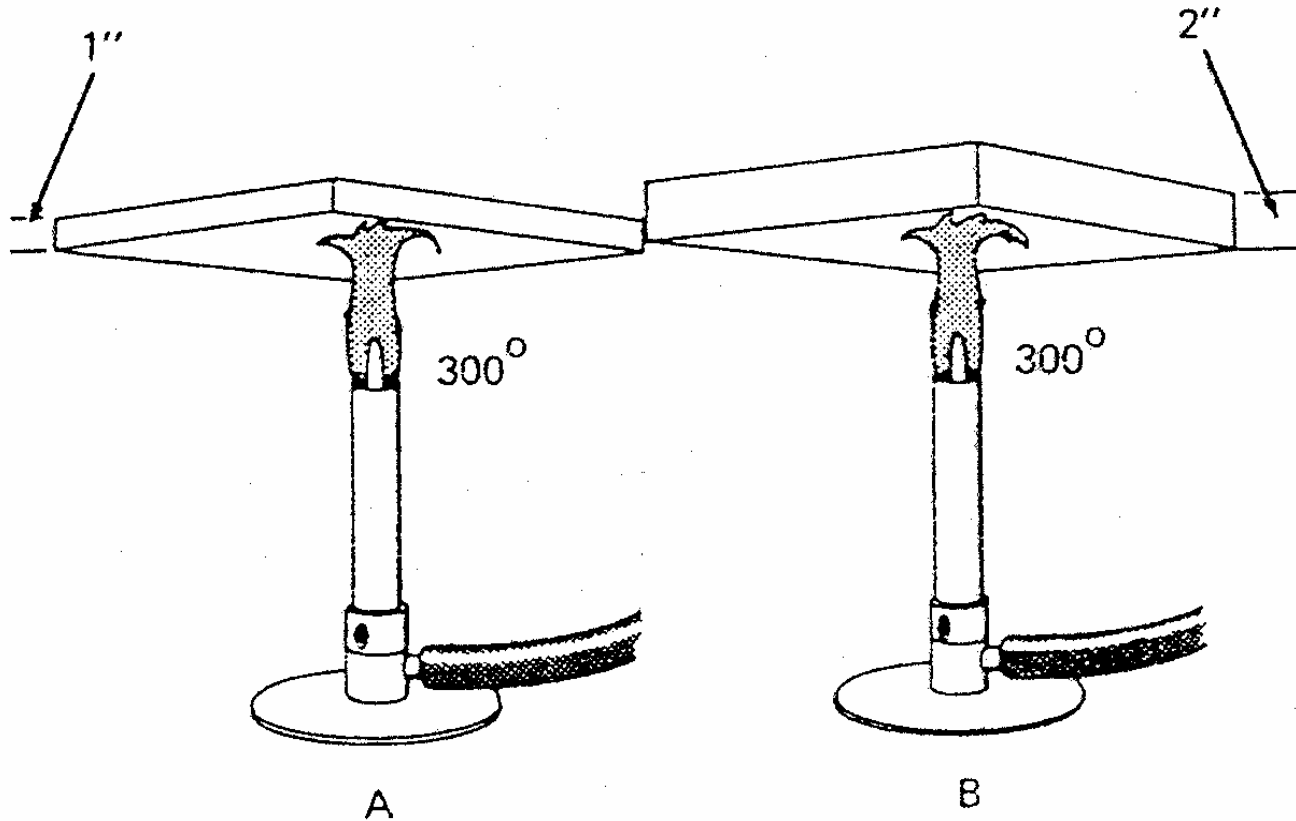
1. KONDUKSI

Adalah proses perpindahan panas jika panas mengalir dari tempat yang suhunya tinggi ke tempat yang suhunya lebih rendah, dengan media penghantar panas tetap.

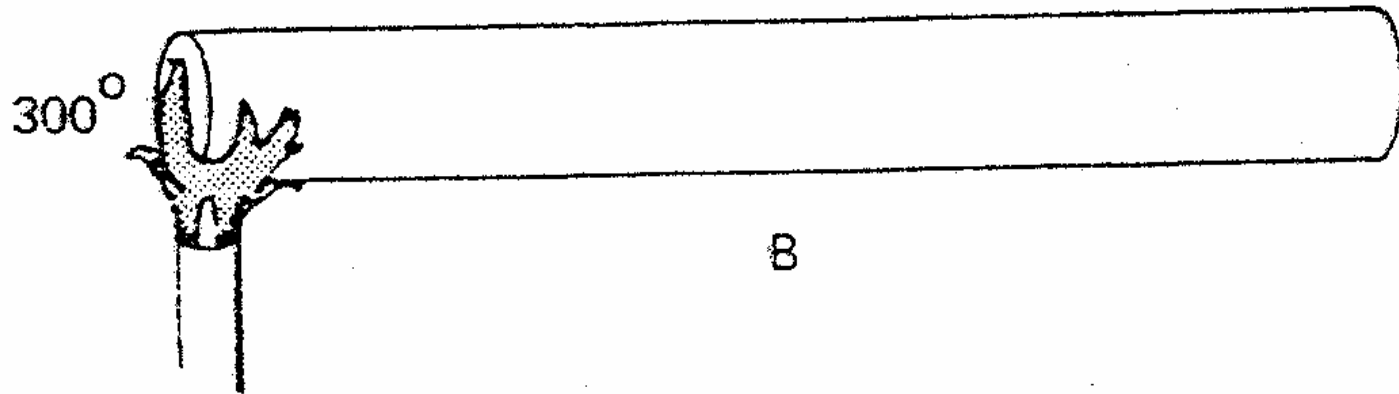
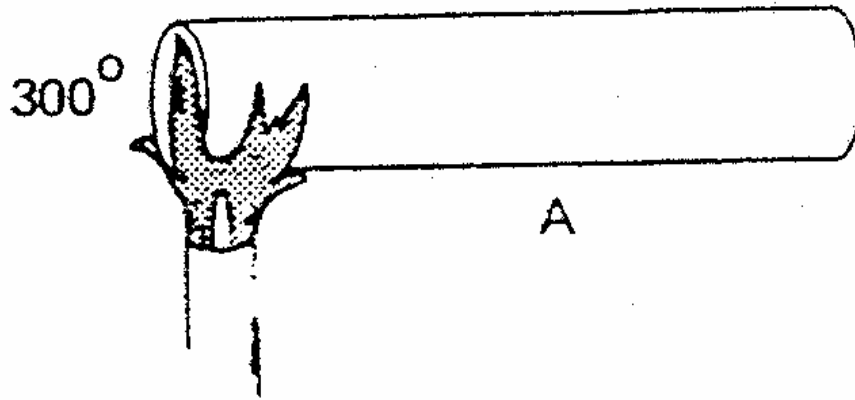
Dasar : Hukum Fourier

$$q_k = k A \left(-\frac{dT}{dx} \right) \quad \text{atau} \quad \frac{q_k}{A} = k \left(-\frac{dT}{dx} \right)$$

Contoh perpindahan panas konduksi



Perpindahan panas konduksi pada bahan dengan ketebalan berbeda, mana yang lebih lama naik suhunya ?



Perpindahan panas konduksi pada bahan dengan panjang berbeda,
mana yang lebih lama panasnya ?

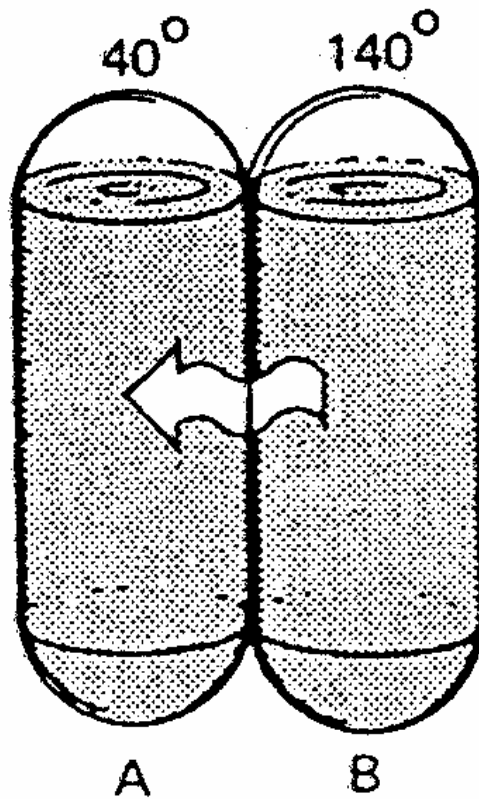


Fig. 1

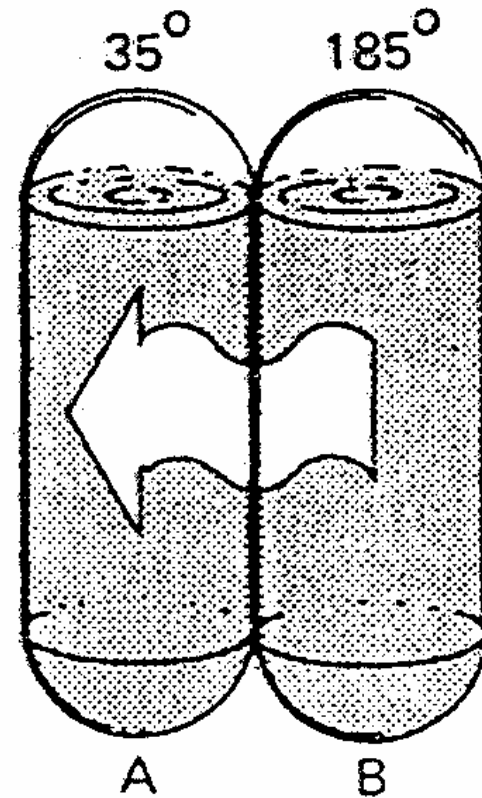


Fig. 2

Perpindahan panas konduksi pada bahan dengan Δ suhu berbeda, mana yang lebih cepat konduksinya ?

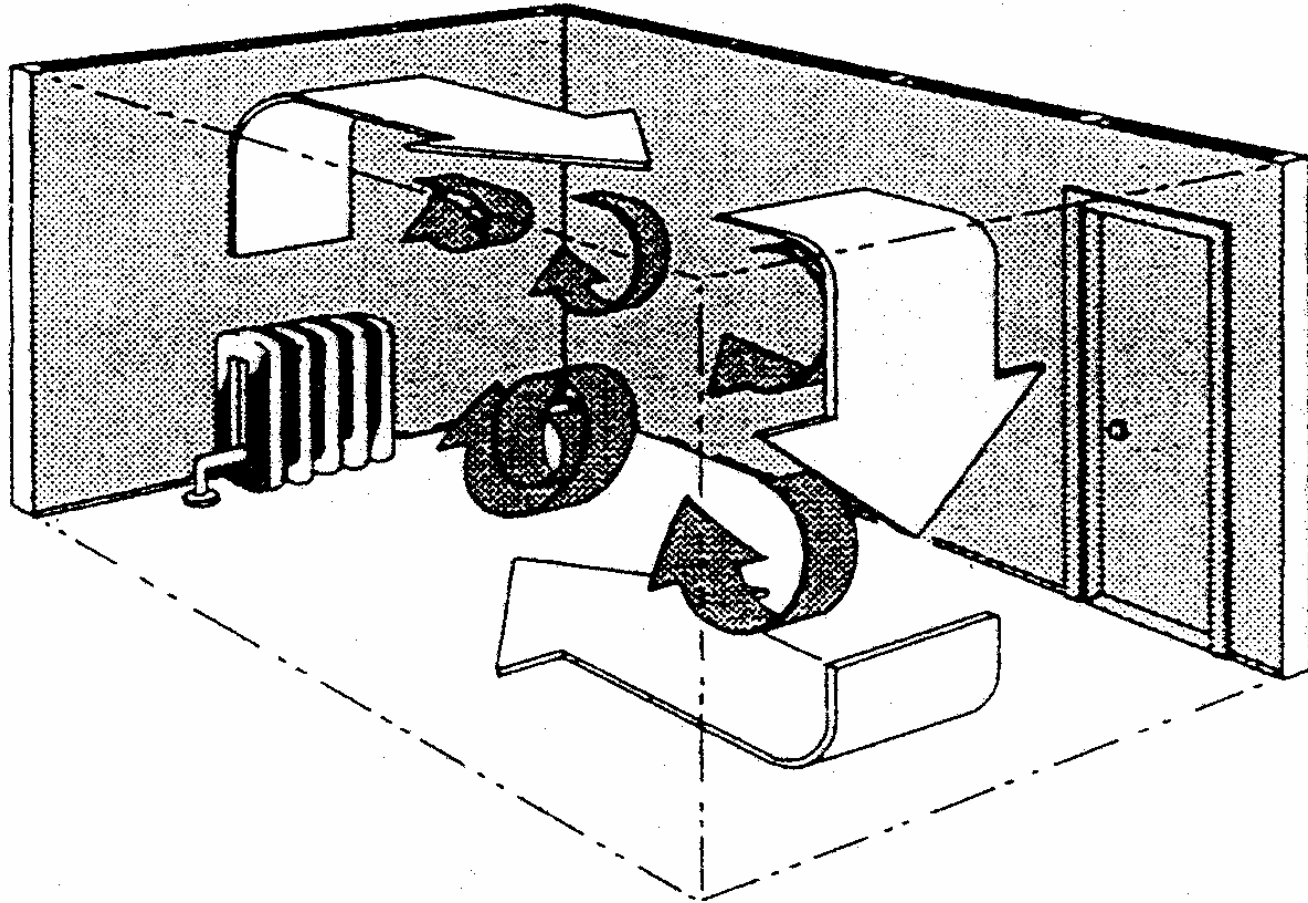
2. KONVEKSI

Yaitu perpindahan panas yang terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir di sekitarnya, dengan menggunakan media penghantar berupa fluida (cairan/gas)

Dasar : Hukum Newton

$$q_c = h_c A (T_w - T_s) \quad \text{atau} \quad \frac{q_c}{A} = h_c (T_w - T_s)$$

Contoh peristiwa perpindahan secara konveksi



Pergerakan udara pada peristiwa perpindahan konveksi dengan sumber panas pada salah satu sudutnya

Macam-macam Konveksi :

1. Konveksi bebas/konveksi alamiah (*free convection/natural convection*)

perpindahan panas yang disebabkan oleh beda suhu dan beda rapat saja dan tidak ada tenaga dari luar yang mendorongnya.

Contoh : plat panas dibiarkan berada di udara sekitar tanpa ada sumber gerakan dari luar

2. Konveksi paksaan (*forced convection*)

perpindahan panas aliran gas atau cairan yang disebabkan adanya tenaga dari luar

Contoh : plat panas dihembus udara dengan kipas/blower

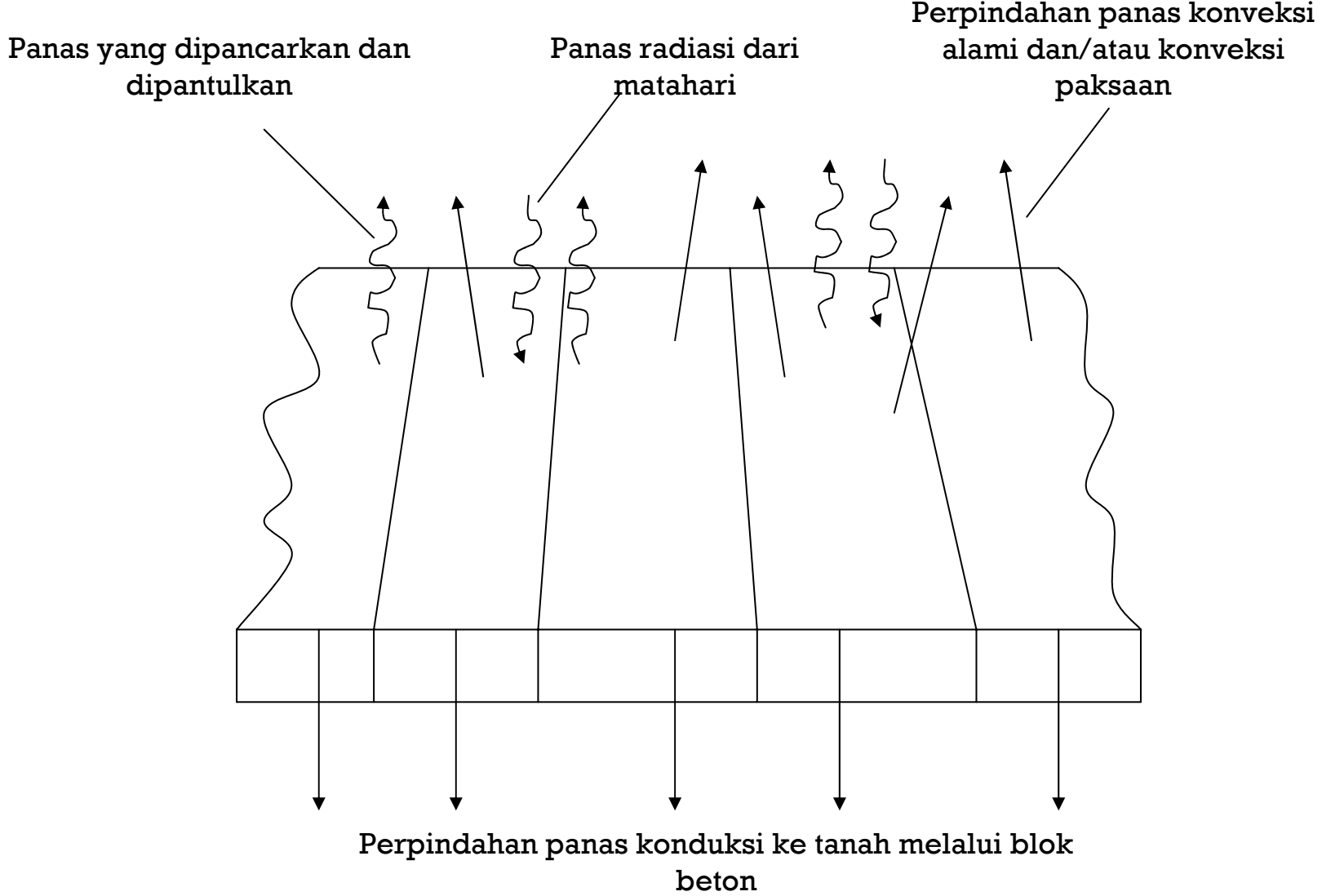
3. RADIASI

Adalah perpindahan panas yang terjadi karena pancaran/sinaran/radiasi gelombang elektro-magnetik, tanpa memerlukan media perantara

Dasar : Hukum Stefan-Boltzman

$$q_r = \varepsilon \sigma A T^4$$

PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI, KONVEKSI, RADIASI



PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI

PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI, STEADY STATE (TUNAK), KOORDINAT SATU DIMENSI

- Meliputi :
 - bidang datar (x, y, z)
 - silinder (r, z, θ)
 - bola (r, θ , ϕ)

Hukum Fourier untuk perpindahan panas konduksi :

$$q = -k A \frac{dT}{dx}$$

Koordinat Cartesian

➤ arah x :

$$q_x = -k A \frac{dT}{dx}$$

➤ arah y :

$$q_y = -k A \frac{dT}{dy}$$

➤ arah z :

$$q_z = -k A \frac{dT}{dz}$$

Koordinat Silinder

➤ arah r :

$$q_r = -k A \frac{dT}{dr}$$

➤ arah θ :

$$q_\theta = -\frac{k}{r} A \frac{dT}{d\theta}$$

➤ arah z :

$$q_z = -k A \frac{dT}{dz}$$

Koordinat Bola

➤ arah r :

$$q_r = -k A \frac{dT}{dr}$$

➤ arah θ :

$$q_\theta = -\frac{k}{r} A \frac{dT}{d\theta}$$

➤ arah ϕ :

$$q_\phi = -\frac{k}{r \sin \theta} A \frac{dT}{d\phi}$$

Konduktivitas Thermal (Daya Hantar Panas)

Adalah sifat bahan yang menunjukkan seberapa cepat bahan itu dapat menghantarkan panas konduksi

Pada umumnya nilai k dianggap tetap, namun sebenarnya nilai k dipengaruhi oleh suhu (T).

Konduktor → bahan yang mempunyai konduktivitas yang baik

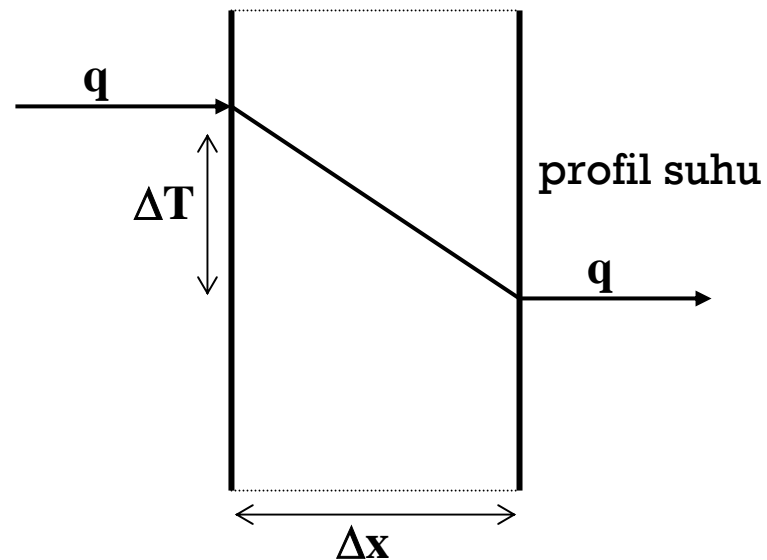
Contoh : logam

Isolator → bahan yang mempunyai konduktivitas yang jelek

Contoh : asbes

PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI PADA BIDANG DATAR

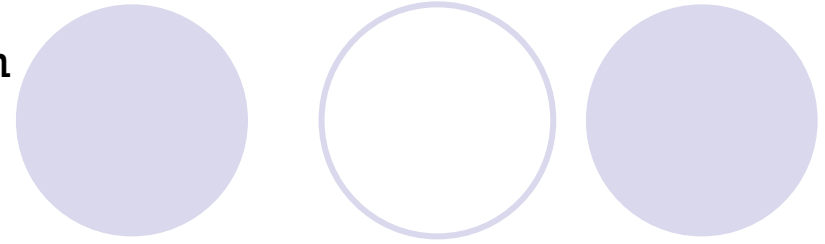
1. Perpindahan Panas Konduksi Pada Satu Bidang Datar (Slab)



$$\text{Hk. Fourier : } q = -kA \frac{dT}{dx} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \longrightarrow q = -\frac{\Delta T}{\Delta x / kA}$$

Laju perpindahan panas, q → aliran

Temperatur → potensial

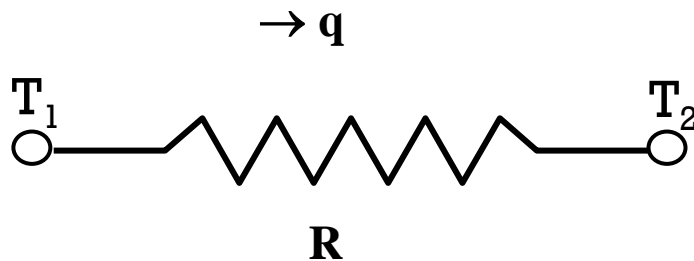


konduktivitas thermal, k
tebal bahan, Δx
luas permukaan, A } → tahanan

Analogi listrik (Hk. Ohm) → Aliran = $\frac{\text{potensial}}{\text{tahanan}}$

$$I = \frac{V}{R} \cong q = -\frac{\Delta T}{\Delta x / kA}$$

Bila aliran panas dinyatakan dengan analogi listrik menjadi :



$$q = -\frac{\Delta T}{R} = -\frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x / kA}$$

$$q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_1 - T_2}{\Delta x / kA}$$

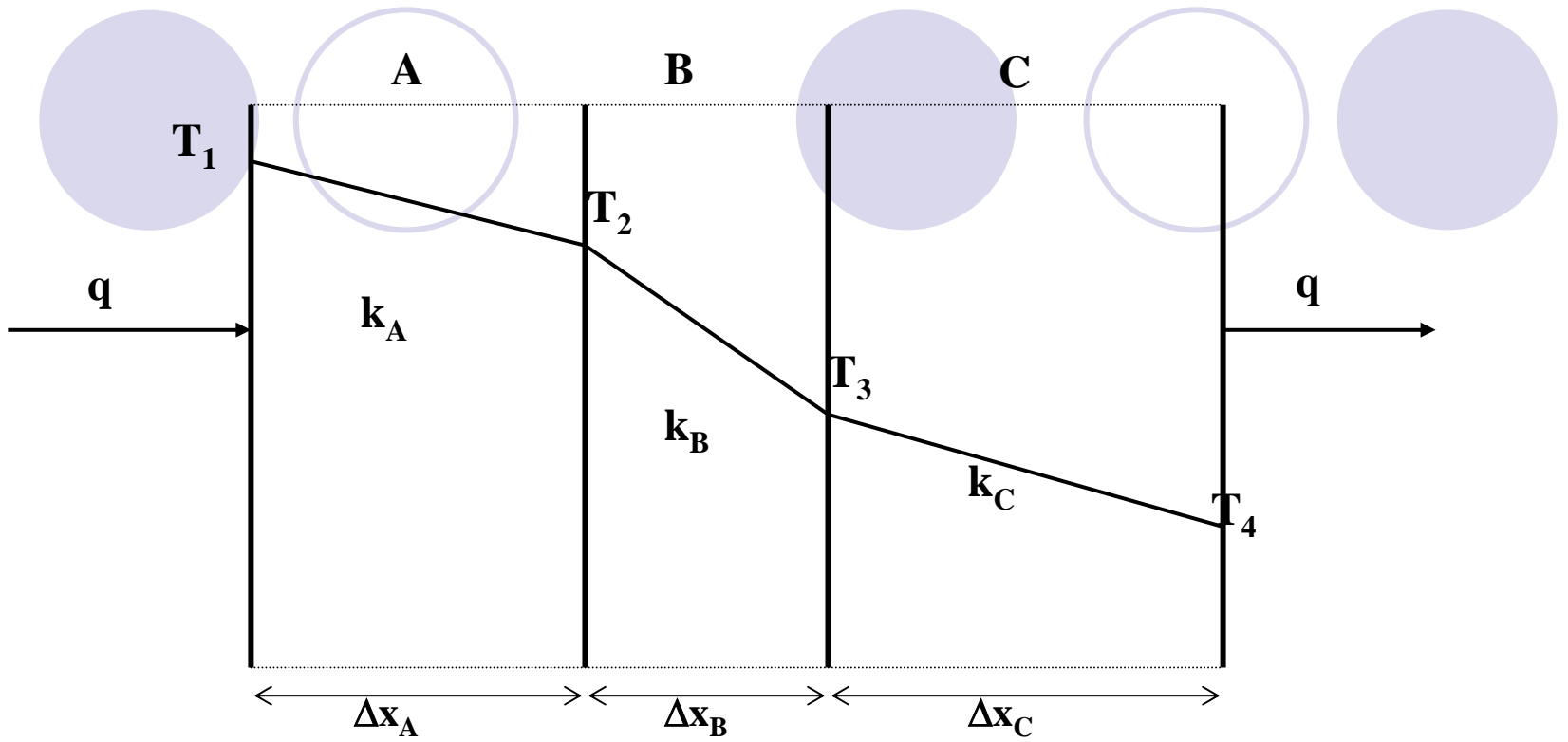


Contoh Soal :

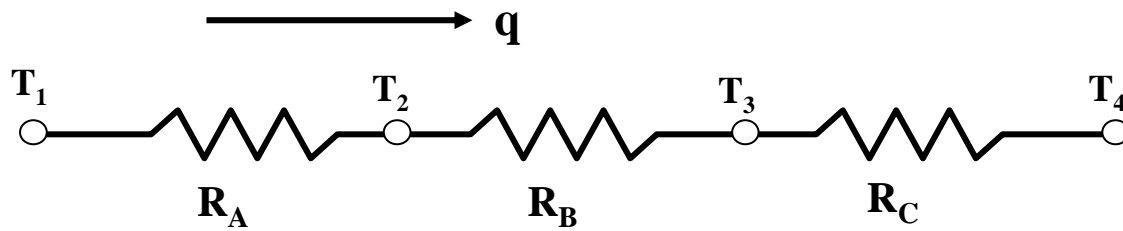
Salah satu permukaan sebuah plat tembaga yang tebalnya 3 cm mempunyai suhu tetap 400°C , sedangkan suhu permukaan yang sebelah lagi dijaga tetap 100°C . Berapa panas yang berpindah melintas lempeng itu?

2. Perpindahan Panas Konduksi Pada Satu Seri Bahan

- Aliran panas dilewatkan pada bidang datar yang disusun berlapis-lapis dengan bahan yang berbeda-beda.
- Aliran panas masuk dengan suhu T_1 dan keluar dengan suhu T_4 . Suhu antar muka masing-masingnya adalah T_2 dan T_3 .
- Contoh : pada konstruksi furnace, boiler, dll.



Analogi listrik bahan yang disusun secara seri :



Persamaan aliran panas untuk seluruh bidang datar adalah :

$$q = \frac{\Delta T \text{ menyeluruh}}{\Sigma R_{th}}$$

R_{th} adalah jumlah tahanan thermal.

Untuk bahan yang disusun seri : $R_{th} = R_A + R_B + R_C + \dots$

Persamaan aliran panas untuk bidang yang disusun seri adalah :

$$q = \frac{\Delta T \text{ menyeluruh}}{\Sigma R_{th}} = \frac{\Delta T}{R_A + R_B + R_C}$$

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\Delta x_A}{k_A A} + \frac{\Delta x_B}{k_B A} + \frac{\Delta x_C}{k_C A}}$$

Pada keadaan steady state, panas yang masuk pada sisi muka sebelah kiri harus sama dengan panas yang meninggalkan sisi muka sebelah kanan,

$$q_{\text{input}} = q_{\text{output}}$$

sehingga,

$$q = q_A = q_B = q_C$$

$$q = \frac{\Delta T}{\Sigma R_{\text{th}}} = \frac{\Delta T_A}{R_A} = \frac{\Delta T_B}{R_B} = \frac{\Delta T_C}{R_C}$$

$$q_A = \frac{T_1 - T_2}{\Delta x_A / k_A A}$$

$$q_B = \frac{T_2 - T_3}{\Delta x_B / k_B A}$$

$$q_C = \frac{T_3 - T_4}{\Delta x_C / k_C A}$$



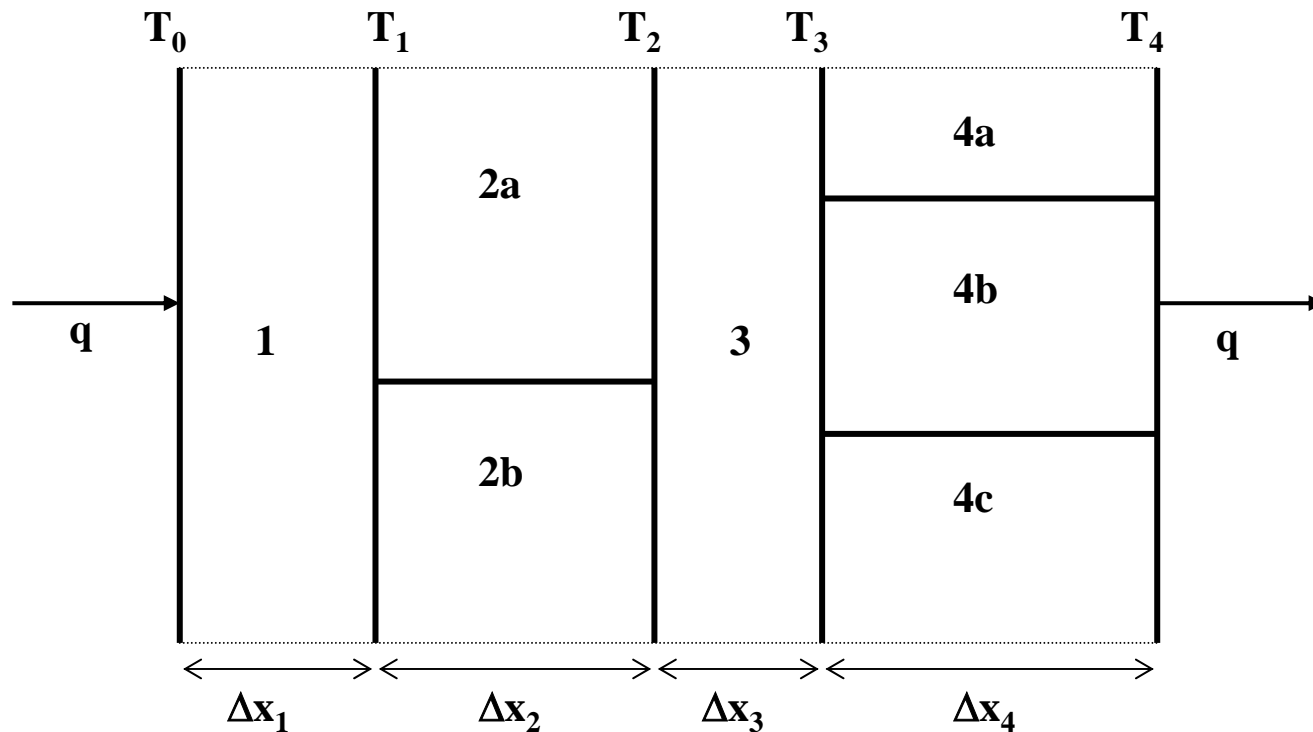
Contoh Soal:

Dinding furnace dilapisi oleh 3 lapisan : firebrick dengan ketebalan 6 in ($k=0.95$ Btu/h.ft. $^{\circ}$ F), insulating brick ($k=0.4$ Btu/h.ft. $^{\circ}$ F) dan common brick ($k=0.8$ Btu/h.ft. $^{\circ}$ F). Suhu masuk firebrick, $T_1 = 1800^{\circ}$ F, suhu maksimum insulating brick, $T_2 = 1720^{\circ}$ F dan suhu $T_3 = 280^{\circ}$ F .

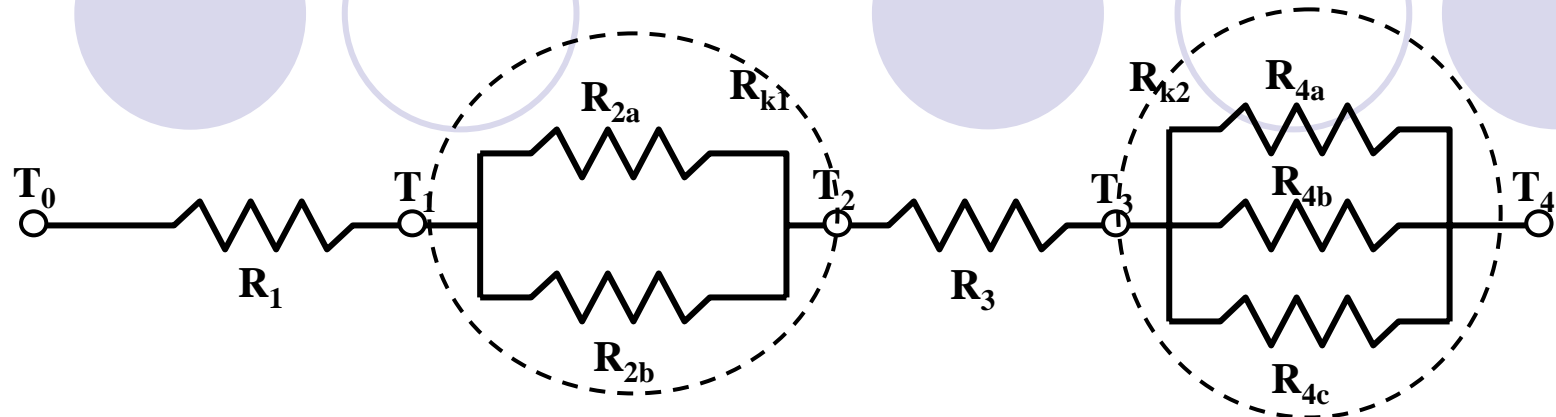
- Hitunglah ketebalan lapisan insulating brick !
- Jika common brick tebalnya 9 in, hitunglah suhu keluar !

3. Perpindahan Panas Konduksi Melalui Bahan yang Disusun Seri dan Paralel

Dinding yang terdiri atas beberapa macam bahan yang dihubungkan seri dan paralel dialiri panas. Perpindahan panas konduksi dianggap berlangsung hanya satu arah (arah x).



Analogi listrik untuk susunan seri dan paralel :

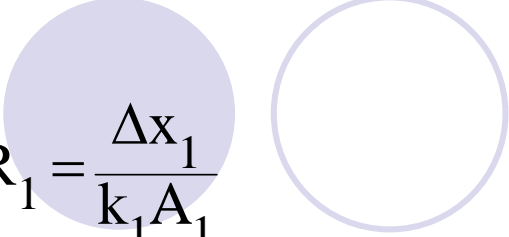


Untuk menyelesaikan susunan di atas, maka tahanan yang disusun paralel harus diselesaikan lebih dahulu sehingga pada akhirnya akan terbentuk susunan seri.

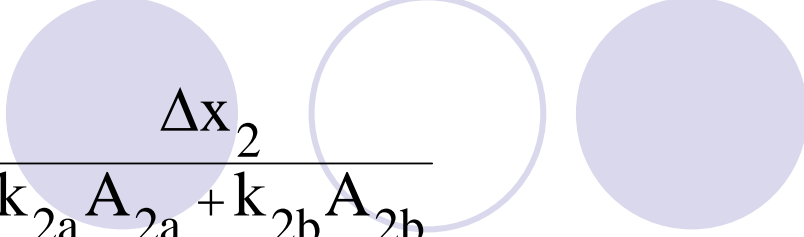
Untuk susunan paralel :
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

Persamaan aliran panas untuk susunan di atas adalah :

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_{th}} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_{k1} + R_3 + R_{k2}}$$



$$R_1 = \frac{\Delta x_1}{k_1 A_1}$$



$$R_{k1} = \frac{\Delta x_2}{k_{2a} A_{2a} + k_{2b} A_{2b}}$$

$$R_3 = \frac{\Delta x_3}{k_3 A_3}$$

$$R_{k2} = \frac{\Delta x_4}{k_{4a} A_{4a} + k_{4b} A_{4b} + k_{4c} A_{4c}}$$

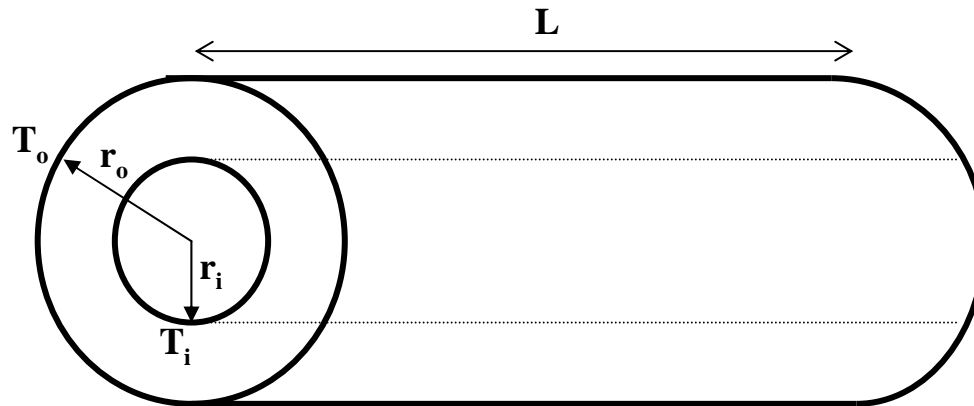
Penyelesaian persamaan aliran panas untuk susunan seri dan paralel adalah :

$$q = \frac{T_0 - T_4}{\frac{\Delta x_1}{k_1 A_1} + \frac{\Delta x_2}{k_{2a} A_{2a} + k_{2b} A_{2b}} + \frac{\Delta x_3}{k_3 A_3} + \frac{\Delta x_4}{k_{4a} A_{4a} + k_{4b} A_{4b} + k_{4c} A_{4c}}}$$

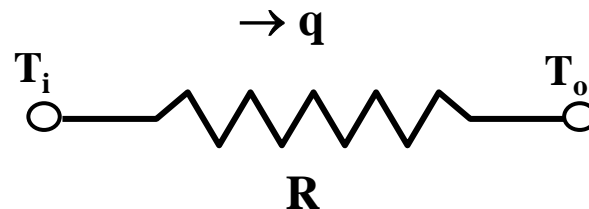
PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI PADA SILINDER

1. Perpindahan Panas Konduksi pada Silinder Berongga

Suatu silinder panjang berongga dengan jari-jari dalam r_i , jari-jari luar r_o dan panjang L dialiri panas sebesar q . Suhu permukaan dalam T_i dan suhu permukaan luar T_o .



Analogi listrik :



Aliran panas hanya berlangsung ke arah radial (arah r) saja. Luas bidang aliran panas dalam system silinder ini adalah :

$$A_r = 2\pi rL$$

Sehingga hukum Fourier menjadi :

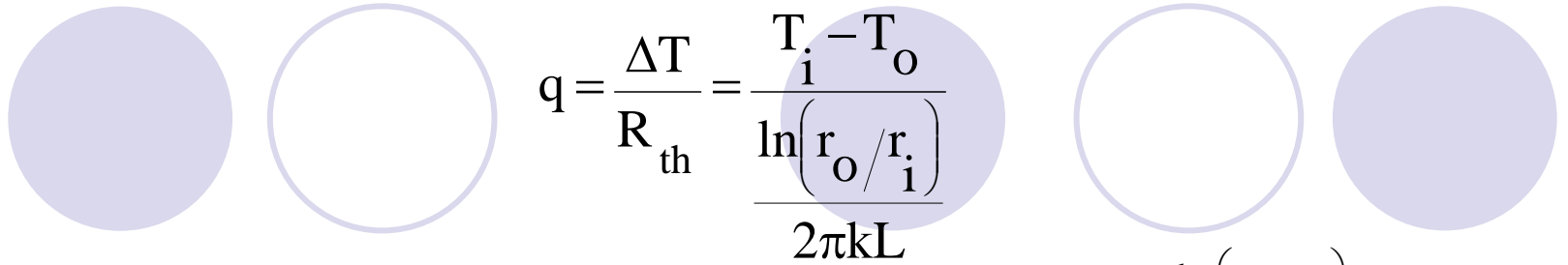
$$q = kA_r \left(-\frac{dT}{dr} \right) = -k2\pi rL \frac{dT}{dr}$$

Kondisi batas (Boundary Condition, BC) :

$$\begin{array}{ll} \text{(i) } r = r_i & \longrightarrow T = T_i \\ \text{(ii) } r = r_o & \longrightarrow T = T_o \end{array}$$

Dengan kondisi batas di atas, persamaan aliran panas untuk koordinat silinder adalah :

$$q = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{\ln(r_o/r_i)} \quad \text{atau} \quad q = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{2,3 \log(r_o/r_i)}$$



$$q = \frac{\Delta T}{R_{th}} = \frac{T_i - T_o}{\frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kL}}$$

Dalam hal ini tahanan thermalnya adalah : $R_{th} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kL}$

Jika D adalah diameter silinder maka : $\frac{r_o}{r_i} = \frac{D_o}{D_i}$

Persamaan aliran panas dapat ditulis,

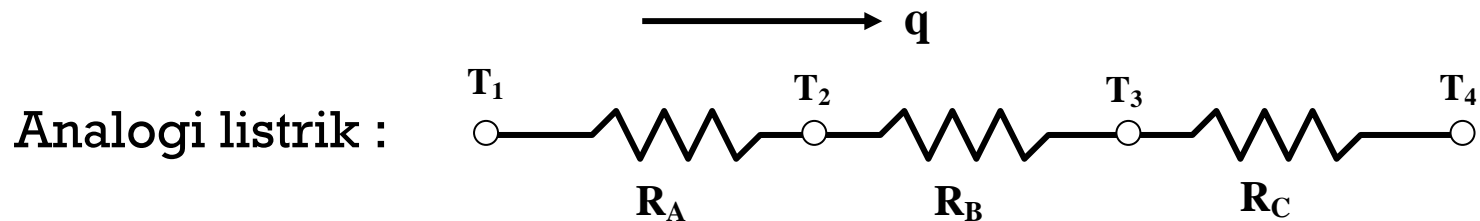
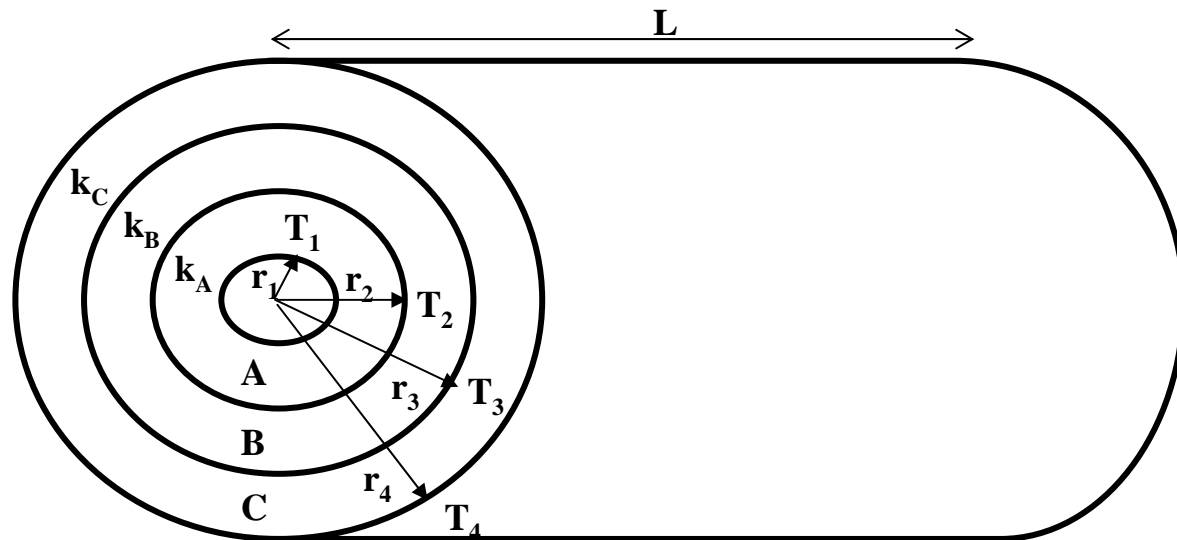
$$q = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{\ln(D_o/D_i)} \quad \text{atau} \quad q = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{2,3 \log(D_o/D_i)}$$

Jika diameter dalam silinder (D_i) > 0,75 diameter luar (D_o), aliran panas bisa dicari dengan :

$$q = \frac{T_i - T_o}{\frac{(D_o - D_i)/2}{\pi kL(D_i + D_o)/2}}$$

2. Perpindahan Panas Konduksi pada Dinding Lapis Rangkap Berbentuk Silinder

Sebuah silinder yang suhu permukaannya relatif tinggi dapat diisolasi dengan beberapa macam bahan yang disusun seri.



Persamaan aliran panas untuk dinding lapis rangkap berbentuk silinder adalah :

$$q = \frac{\Delta T_{\text{menyeluruh}}}{\Sigma R_{\text{th}}} = \frac{\Delta T}{R_A + R_B + R_C}$$

$$R_A = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L}$$

$$R_B = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L}$$

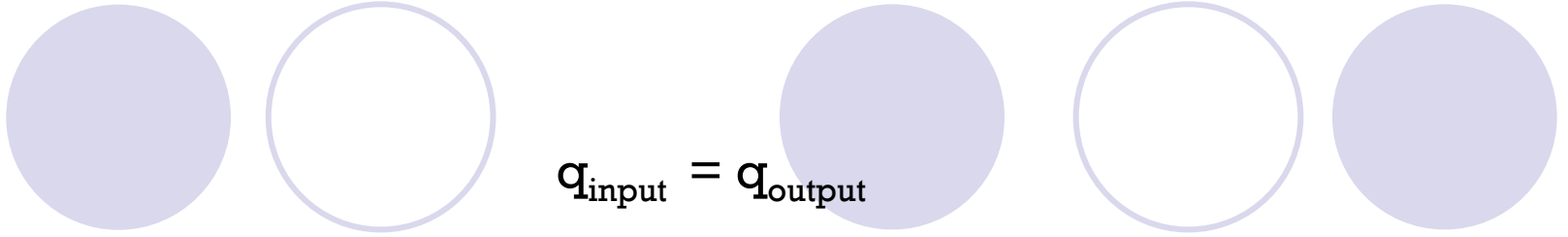
$$R_C = \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L}$$

sehingga,

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L}}$$

atau

$$q = \frac{2\pi L(T_1 - T_4)}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{k_A} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_B} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{k_C}}$$



sehingga,

$$q = \frac{\Delta T}{\Sigma R_{\text{th}}} = \frac{\Delta T_A}{R_A} = \frac{\Delta T_B}{R_B} = \frac{\Delta T_C}{R_C}$$

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\Sigma R_{\text{th}}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L}}$$



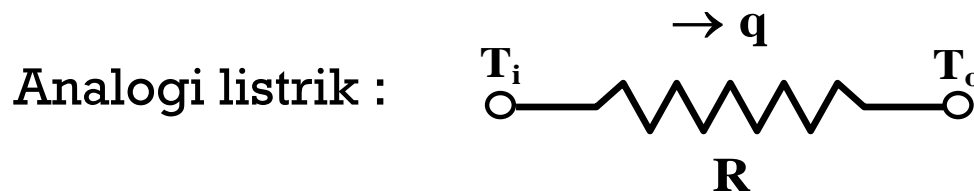
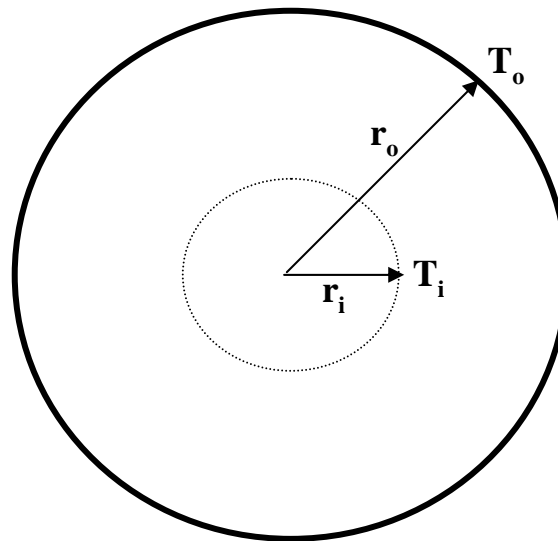
Contoh soal :

Sebuah pipa uap panas mempunyai suhu dalam 250°C . Diameter dalam pipa adalah 8 cm, tebalnya 5,5 mm. Pipa itu dilapisi dengan lapisan isolasi yang mempunyai $k = 0,5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ setebal 9 cm, diikuti dengan lapisan lain dengan $k = 0,25 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ setebal 4 cm. Suhu luar isolasi adalah 20°C . Hitunglah kehilangan kalor per satuan panjang andaikan $k = 47 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ untuk pipa !

PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI PADA BOLA

1. Perpindahan Panas Konduksi pada Bola Berongga

Suatu bola berongga dengan jari-jari dinding dalam r_i , jari-jari dinding luar r_o dan panjang L dialiri panas sebesar q . Suhu permukaan dalam T_i dan suhu permukaan luar T_o .



Aliran panas hanya berlangsung ke arah radial (arah r) saja.
Luas bidang aliran panas adalah :

$$A_r = 4\pi r^2$$

Sehingga hukum Fourier menjadi :

$$q = kA_r \left(-\frac{dT}{dr} \right) = -k4\pi r^2 \frac{dT}{dr}$$

Kondisi batas (Boundary Condition, BC) :

$$(i) \quad r = r_i \longrightarrow T = T_i$$

$$(ii) \quad r = r_o \longrightarrow T = T_o$$

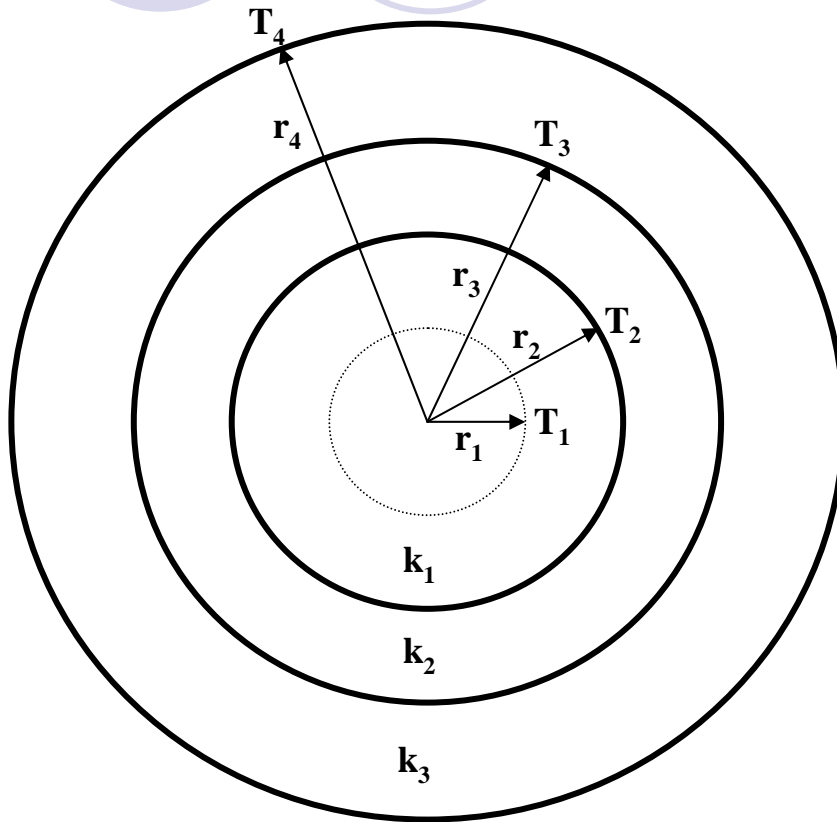
Dengan kondisi batas di atas, persamaan aliran panas untuk koordinat bola adalah :

$$q = \frac{4\pi k (T_i - T_o)}{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_o}} \longrightarrow q = \frac{\Delta T}{R_{th}} = \frac{T_i - T_o}{\frac{1/r_i - 1/r_o}{4\pi k}}$$

Dalam hal ini tahanan thermalnya adalah :

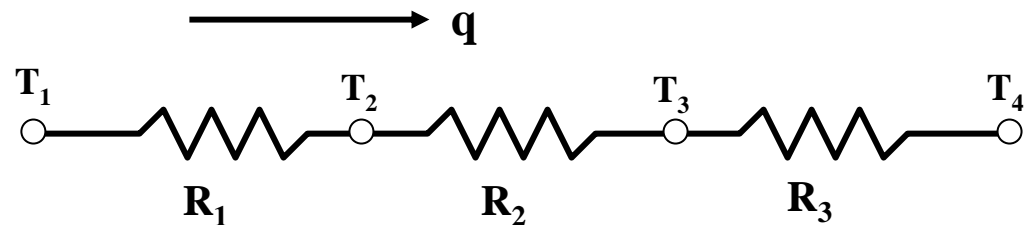
$$R_{th} = \frac{1/r_i - 1/r_o}{4\pi k} = \frac{r_o - r_i}{4\pi k r_i r_o}$$

2. Perpindahan Panas Konduksi pada Dinding Lapis Rangkap Berbentuk Bola



Sebuah bola yang suhu permukaannya relatif tinggi dapat diisolasi dengan beberapa macam bahan.

Analogi listrik :



Persamaan aliran panas untuk dinding lapis rangkap berbentuk bola adalah :

$$q = \frac{\Delta T_{\text{menyeluruh}}}{\Sigma R_{\text{th}}} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2 + R_3}$$

sehingga,

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{1/r_1 - 1/r_2}{4\pi k_1} + \frac{1/r_2 - 1/r_3}{4\pi k_2} + \frac{1/r_3 - 1/r_4}{4\pi k_3}} \quad \text{atau} \quad q = \frac{4\pi(T_1 - T_4)}{\frac{1/r_1 - 1/r_2}{k_1} + \frac{1/r_2 - 1/r_3}{k_2} + \frac{1/r_3 - 1/r_4}{k_3}}$$

$$q_{\text{input}} = q_{\text{output}}$$

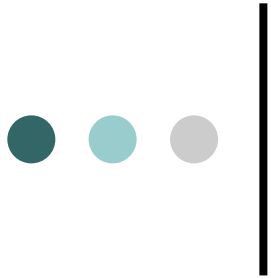
$$q = \frac{\Delta T}{\Sigma R_{\text{th}}} = \frac{\Delta T_1}{R_1} = \frac{\Delta T_2}{R_2} = \frac{\Delta T_3}{R_3}$$

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\Sigma R_{\text{th}}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1/r_1 - 1/r_2}{4\pi k_1}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{1/r_2 - 1/r_3}{4\pi k_2}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{1/r_3 - 1/r_4}{4\pi k_3}}$$



Contoh Soal :

Sebuah bola lowong terbuat dari alumunium ($k = 202 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$) dengan diameter dalam 4 cm dan diameter luar 8 cm. Suhu bagian dalam adalah 100°C dan suhu luar 50°C . Hitunglah perpindahan kalornya !



PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI DAN KONVEKSI SECARA SIMULTAN

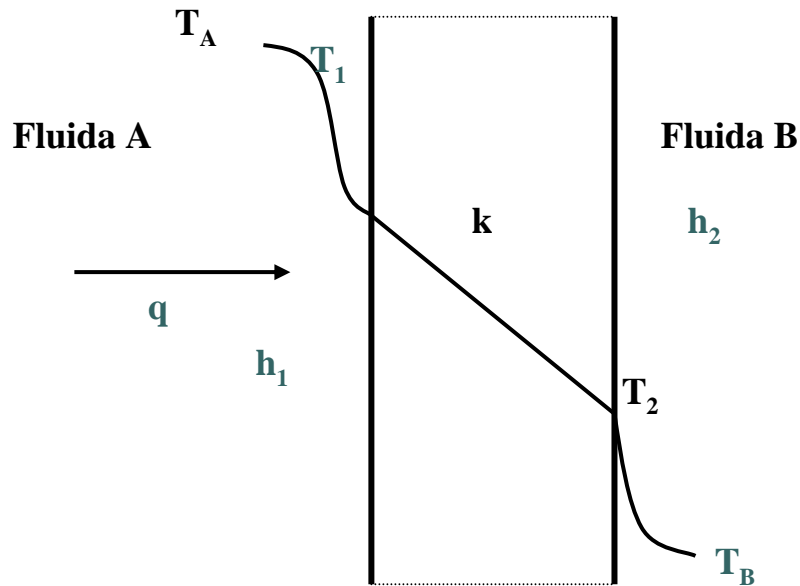
KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS MENYELURUH (*OVERALL HEAT TRANSFER COEFFICIENT, U*)

Adalah merupakan aliran panas menyeluruh sebagai hasil gabungan proses konduksi dan konveksi.

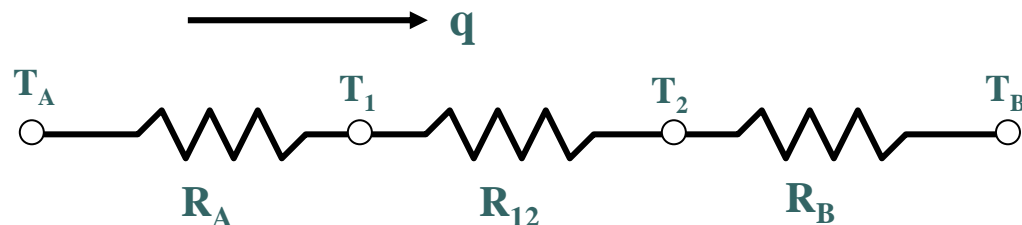
Koefisien perpindahan panas menyeluruh dinyatakan dengan $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ($Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$)

1. KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS MENYELURUH PADA BIDANG BATAR

Suatu bidang datar, salah satu sisinya terdapat fluida panas A dan sisi lainnya terdapat fluida B yang lebih dingin.



Analogi listrik :



Perpindahan panas menyeluruh dinyatakan dengan :

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{kA} + \frac{1}{h_2 A}} = \frac{A(T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

Selain itu $q = UA \Delta T_{\text{menyeluruh}}$

sehingga koefisien perpindahan panas menyeluruh dapat dinyatakan dengan :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

● ● Untuk bidang datar yang disusun seri,

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \sum \left(\frac{\Delta x}{kA} \right) + \frac{1}{h_2 A}} = \frac{A(T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1} + \sum \left(\frac{\Delta x}{k} \right) + \frac{1}{h_2}}$$

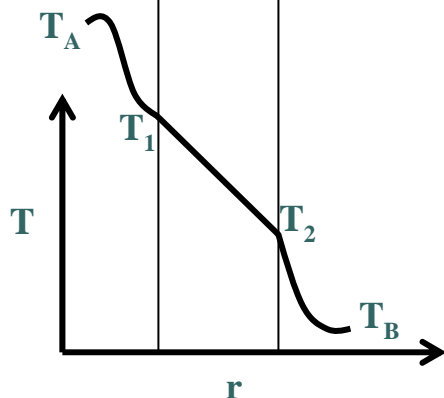
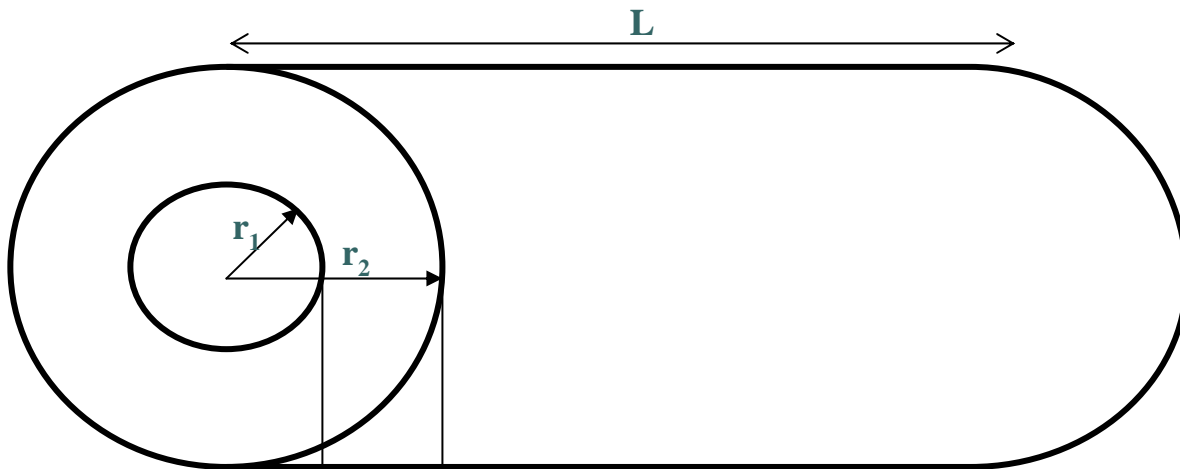
sehingga koefisien perpindahan panas menyeluruh dapat dinyatakan dengan :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum \left(\frac{\Delta x}{k} \right) + \frac{1}{h_2}}$$

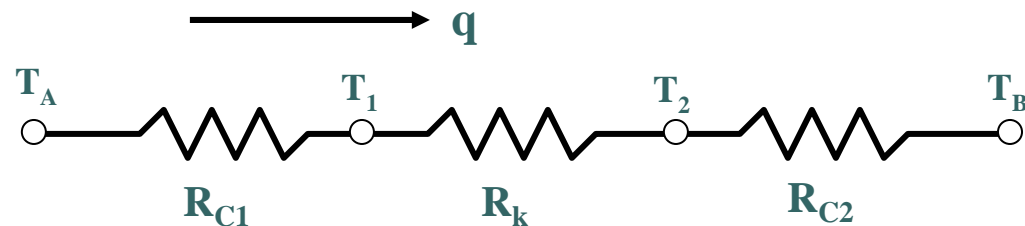
$$U = \frac{1}{A \left(R_{C_1} + \sum R_k + R_{C_2} \right)}$$

2. KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS MENYELURUH PADA SILINDER

Suatu silinder berongga terkena lingkungan konveksi di permukaan bagian dalam dan luar oleh fluida A dan fluida B. Suhu kedua fluida, T_A dan T_B . Zat alir mengalir melalui pipa pada suhu T_A . Perpindahan panas dari zat alir ke pipa secara konveksi diteruskan lewat pipa secara konduksi dan selanjutnya ke zat alir yang ada di luar pipa pada suhu T_B secara konveksi.



Analogi listrik :



Perpindahan panas menyeluruh dari zat alir di dalam pipa ke zat alir di luar pipa adalah

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_2 A_2}}$$

Luas permukaan untuk perpindahan panas zat alir :

□ di dalam pipa, $A_1 = 2\pi r_1 L$

□ di luar pipa, $A_2 = 2\pi r_2 L$

sehingga,

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_2 2\pi r_2 L}} = \frac{2\pi L (T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1 r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_2 r_2}}$$

Koefisien perpindahan panas menyeluruh dapat didasarkan atas bidang dalam atau bidang luar tabung.

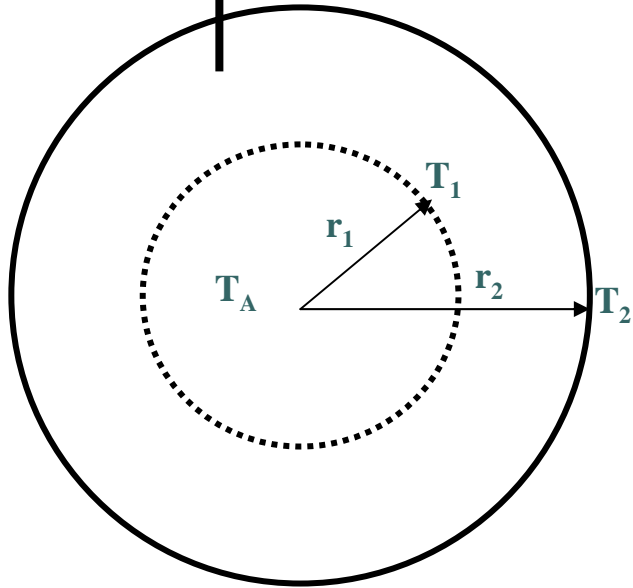
□ Bidang dalam,

$$q = \frac{A_1(T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1} + \frac{A_1 \ln(r_2/r_1)}{2\pi kL} + \frac{A_1}{h_2 A_2}} = \frac{2\pi r_1 L(T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{r_1}{h_2 r_2}}$$
$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{r_1}{h_2 r_2}}$$

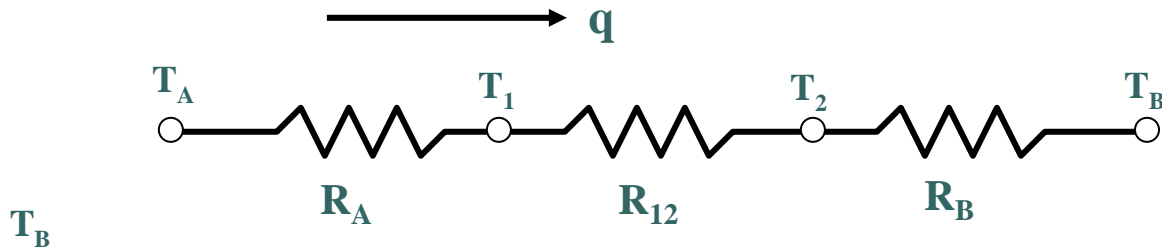
□ Bidang luar,

$$q = \frac{A_2(T_A - T_B)}{\frac{A_2}{h_1 A_1} + \frac{A_2 \ln(r_2/r_1)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_2}} = \frac{2\pi r_2 L(T_A - T_B)}{\frac{r_2}{h_1 r_1} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_2}}$$
$$U_2 = \frac{1}{\frac{r_2}{h_1 r_1} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

3. KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS MENYELURUH PADA BOLA



Analogi listrik :



Perpindahan panas menyeluruh dari zat alir di dalam pipa ke zat alir di luar pipa adalah

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{1/r_1 - 1/r_2}{4\pi k} + \frac{1}{h_2 A_2}}$$

Koefisien perpindahan panas menyeluruh,

□ Bidang dalam,

$$q = \frac{A_1(T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1} + \frac{A_1\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}{4\pi k} + \frac{A_1}{h_2 A_2}} = \frac{4\pi r_1^2(T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1^2\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}{k} + \frac{r_1^2}{h_2 r_2^2}}$$
$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1^2\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}{k} + \frac{r_1^2}{h_2 r_2^2}}$$

□ Bidang luar,

$$q = \frac{A_2(T_A - T_B)}{\frac{A_2}{h_1 A_1} + \frac{A_2\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}{4\pi k} + \frac{1}{h_2}} = \frac{4\pi r_2^2(T_A - T_B)}{\frac{r_2^2}{h_1 r_1^2} + \frac{r_2^2\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}{k} + \frac{1}{h_2}}$$
$$U_2 = \frac{1}{\frac{r_2^2}{h_1 r_1^2} + \frac{r_2^2\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}{k} + \frac{1}{h_2}}$$



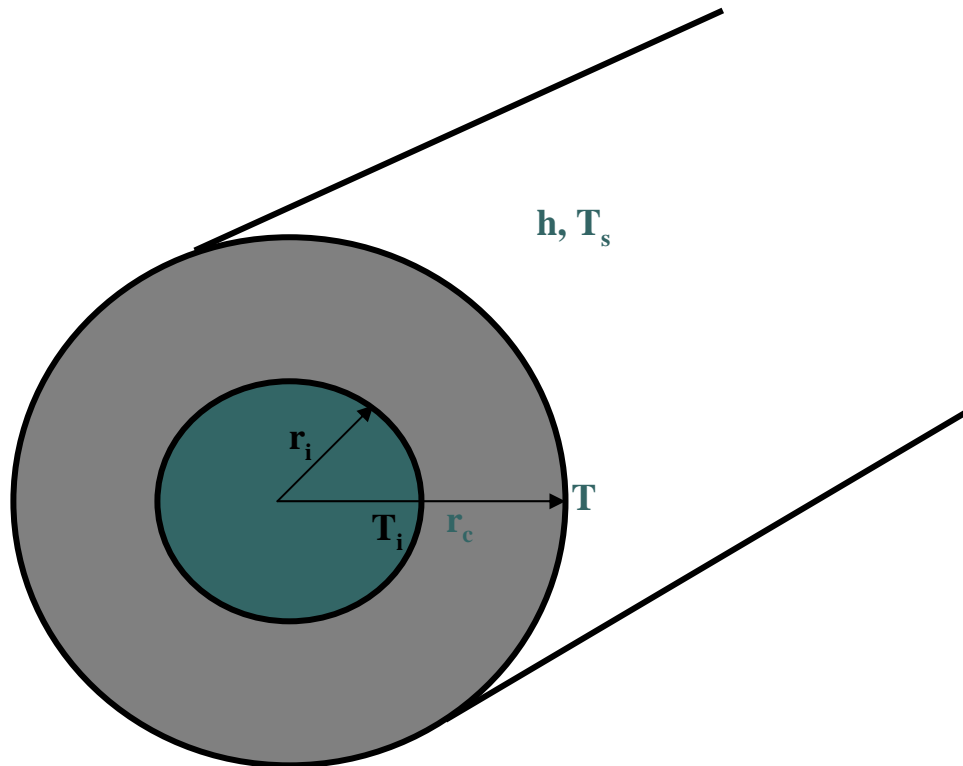
Contoh soal :

- Sebuah bola lowong terbuat dari alumunium ($k = 202 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$) dengan diameter dalam 4 cm dan diameter luar 8 cm. Suhu bagian dalam adalah 100°C dan suhu luar 50°C . Hitunglah perpindahan kalornya!
- Jika bola di atas dilapisi dengan bahan isolasi yang mempunyai $k = 50 \text{ mW/m}\cdot\text{°C}$ setebal 1 cm. Bagian luar isolasi ini bersentuhan dengan lingkungan yang mempunyai $h = 20 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$ dan $T_s = 10\text{°C}$. Bagian dalam bola tetap mempunyai suhu 100°C , hitunglah perpindahan kalor dalam kondisi ini!

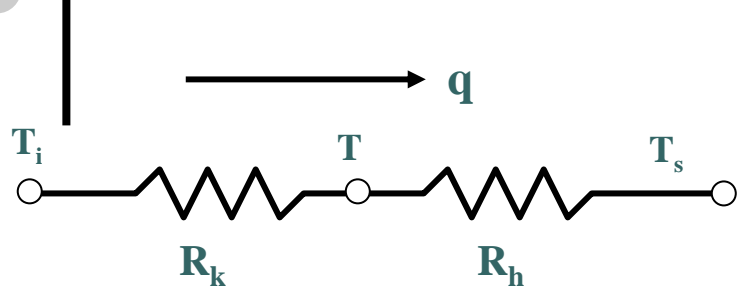
TEBAL ISOLASI KRITIS

1. SILINDER TERISOLASI

Sebuah pipa bundar dipasang selapis isolasi di sekelilingnya. Suhu dinding dalam isolasi adalah T_i sedang suhu luarnya terkena konveksi sebesar T_s .



Analogi listrik untuk pipa terisolasi adalah



$$R_k = \frac{\ln(r_c/r_i)}{2\pi kL}$$

$$R_h = \frac{1}{2\pi r_c Lh}$$

Persamaan perpindahan panas untuk pipa terisolasi adalah :

$$q = \frac{\Delta T_{\text{menyeluruh}}}{\Sigma R_{\text{th}}} = \frac{T_i - T_s}{\frac{\ln(r_c/r_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{2\pi r_c Lh}}$$

$$q = \frac{2\pi L(T_i - T_s)}{\frac{\ln(r_c/r_i)}{k} + \frac{1}{r_c h}}$$

● Untuk menentukan jari-jari kritis isolasi (r_c) agar perpindahan panasnya maksimum dapat dicari dengan 2 cara, yaitu

$$\frac{dq}{dr_c} = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{dR}{dr_c} = 0$$

Jari-jari kritis diperoleh : $r_c = \frac{k}{h}$

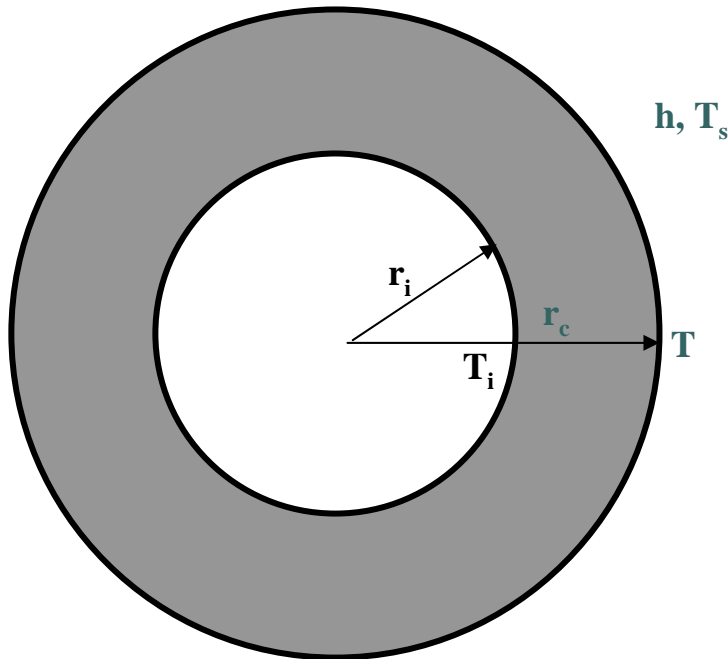
Artinya, perpindahan panas maksimum dari pipa terjadi ketika jari-jari kritis sama dengan ratio konduktivitas thermal isolasi dengan koefisien perpindahan panas permukaan.

Jika $r_c < \frac{k}{h}$ \longrightarrow perpindahan panas meningkat dengan penambahan tebal isolasi.

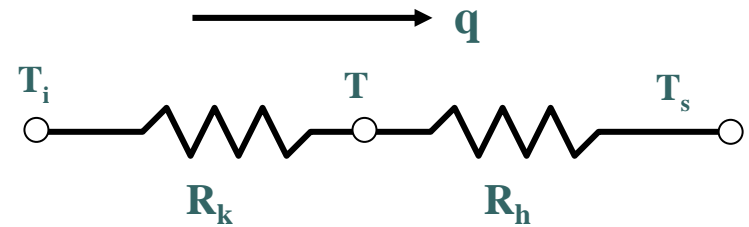
$r_c > \frac{k}{h}$ \longrightarrow perpindahan panas menurun dengan penambahan tebal isolasi.

2. BOLA TERISOLASI

Sebuah bola dipasang selapis isolasi di sekelilingnya. Suhu dinding dalam isolasi adalah T_i sedang suhu luarnya terkena konveksi sebesar T_s .



Analogi listrik untuk bola terisolasi adalah



$$R_k = \frac{1/r_i - 1/r_c}{4\pi k}$$

$$R_h = \frac{1}{4\pi r_c^2 h}$$

Persamaan perpindahan panas untuk bola terisolasi adalah :

$$q = \frac{\Delta T_{\text{menyeluruh}}}{\Sigma R_{\text{th}}} = \frac{T_i - T_s}{\frac{1/r_i - 1/r_c}{4\pi k} + \frac{1}{4\pi r_c^2 h}}$$

$$q = \frac{4\pi(T_i - T_s)}{\frac{1/r_i - 1/r_c}{k} + \frac{1}{r_c^2 h}}$$

Untuk menentukan jari-jari kritis isolasi (r_c) agar perpindahan panasnya maksimum dapat dicari dengan 2 cara, yaitu

$$\frac{dq}{dr_c} = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{dR}{dr_c} = 0$$

Jari-jari kritis diperoleh : $r_c = \frac{2k}{h}$



Contoh soal :

Sebuah benda berbentuk pipa berdiameter 5 cm dan bersuhu 200°C diisolasi dengan menggunakan asbes ($k = 0,17 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$). Benda tersebut terkena udara kamar yang suhunya 20°C dengan $h = 3,0 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$.

- Turunkan persamaan untuk jari-jari kritis isolasi tersebut !
- Hitunglah jari-jari kritis isolasi asbes !
- Hitung panas yang hilang pada jari-jari kritis !
- Hitung panas yang hilang jika tanpa isolasi !

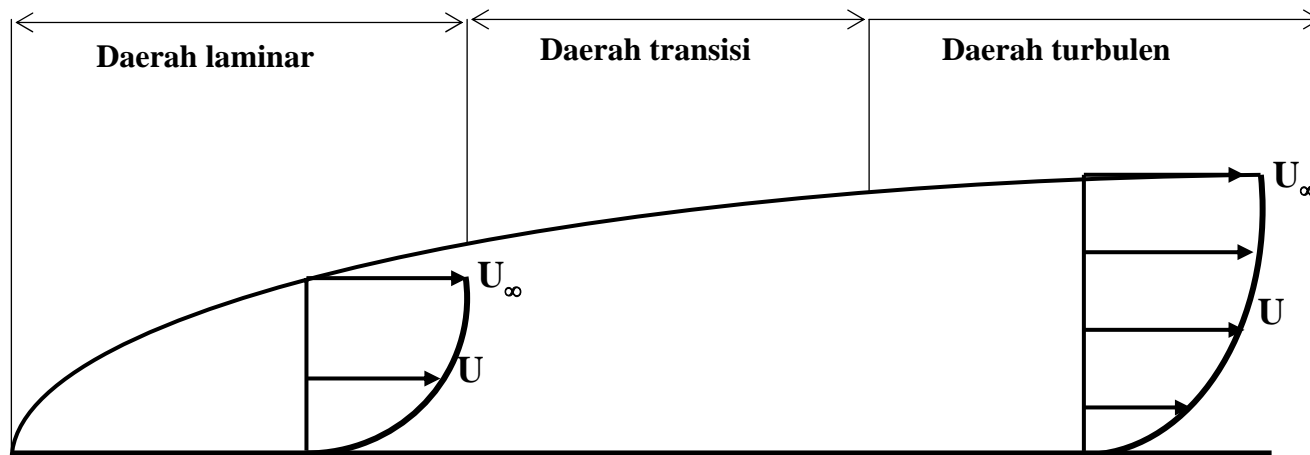
PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI

*Cara-cara meramalkan nilai koefisien
perpindahan kalor konveksi, h*



KONVEKSI PAKSA (*FORCED CONVECTION FLOW SYSTEM*)

ALIRAN DI ATAS PLAT RATA



Berbagai daerah aliran lapisan batas di atas plat rata

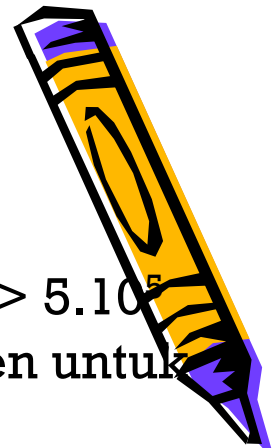
Pengelompokan aliran yang mengalir di atas plat diketahui dari bilangan Reynolds

$$Re = \frac{U_\infty \cdot x}{\nu} = \frac{\rho \cdot U_\infty \cdot x}{\mu}$$

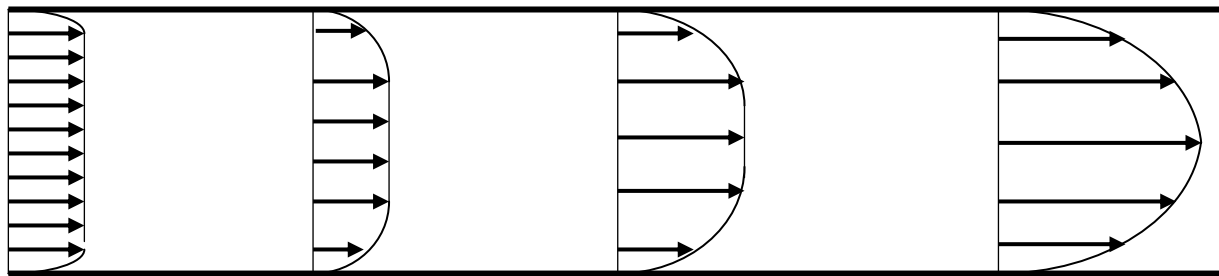


dimana : U_{∞} = kecepatan aliran bebas
 x = jarak dari tepi depan
 $\nu = \mu/\rho$ = viskositas kinematik

Transisi dari aliran laminar menjadi turbulen terjadi bila $Re > 5 \cdot 10^5$
Untuk aliran sepanjang plat rata, lapisan batas selalu turbulen untuk $Re \geq 4 \cdot 10^6$



ALIRAN DALAM TABUNG



Aliran berkembang penuh

Untuk aliran turbulen biasanya

$$Re_d = \frac{U_m \cdot d}{\nu} = \frac{U_m \cdot d \cdot \rho}{\mu} > 2300$$



∞ LAPISAN BATAS PADA PLAT RATA

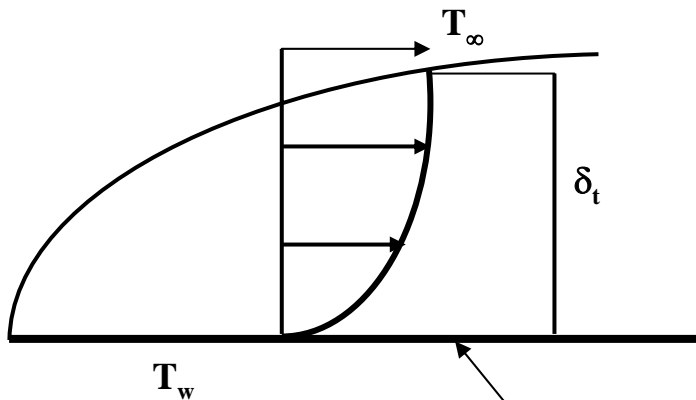


Lapisan Batas Termal

Daerah dimana terdapat gradien suhu dalam aliran akibat proses pertukaran kalor antara fluida dan dinding

Lapisan Batas Hidrodinamik

Daerah aliran dimana gaya-gaya viscous dirasakan



T_w = suhu dinding
 T_∞ = suhu fluida di luar lapisan batas termal
 δ_t = tebal lapisan termal

$$\frac{q_w}{A} = -k \left. \frac{dT}{dy} \right|_w$$



Angka Prandtl

Parameter yang menghubungkan ketebalan relatif antara lapisan batas hidrodinamik dan lapisan batas termal

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{k/\rho C_p} = \frac{C_p \cdot \mu}{k}$$

Angka Nusselt :
$$Nu_x = \frac{h_x \cdot x}{k}$$

Untuk plat yang dipanaskan pada keseluruhan panjangnya :

$$Nu_x = 0,332 Pr^{1/3} Re_x^{1/2}$$

berlaku untuk fluida yang mempunyai angka Prandtl antara 0,6 – 50.

Untuk angka Prandtl yang rendah :
$$Nu_x = 0,530 Pr^{1/2} Re_x^{1/2}$$

Untuk Angka Prandtl yang tinggi :

$$Nu_x = \frac{0,3387 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,0468}{Pr} \right)^{2/3} \right]^{1/4}}$$



Koefisien perpindahan kalor rata-rata dan angka Nusselt bisa diperoleh dengan :

$$\bar{h} = 2h_x$$

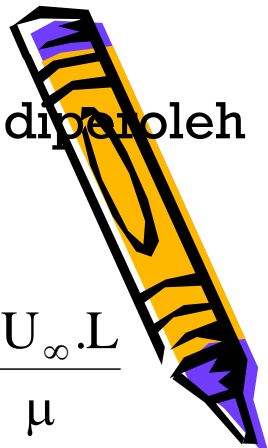
$$\overline{Nu}_L = 2 Nu_x = 0,664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad \text{dimana} \quad Re_L = \frac{\rho \cdot U_\infty \cdot L}{\mu}$$

Analisa di atas didasarkan atas pengandaian bahwa sifat-sifat fluida konstan di seluruh aliran. Jika terdapat perbedaan menyolok antara kondisi dinding dan kondisi aliran bebas, sifat-sifat tersebut dievaluasi pada suhu film, T_f yaitu rata-rata aritmatik antara suhu dinding dan suhu aliran bebas.

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2}$$

Beda suhu rata-rata sepanjang plat dapat dihitung dengan :

$$\overline{T_w - T_\infty} = \frac{q_w L/k}{0,6795 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}}$$



ALIRAN TURBULEN DALAM TABUNG

Untuk aliran turbulen yang sudah jadi atau berkembang penuh

Bilangan Reynolds :
$$Re_d = \frac{\rho U_m d}{\mu}$$

Bilangan Nusselt :
$$Nu_d = \frac{h d}{k}$$

$$Nu_d = 0,023 Re_d^{0,8} Pr^n$$

Nilai n : n = 0,4 untuk pemanasan
 n = 0,3 untuk pendinginan

Perpindahan kalor per satuan panjang :

$$\frac{q}{L} = h \pi d (T_w - T_b)$$



Contoh Soal :

Udara pada 27°C dan 1 atm mengalir di atas sebuah plat rata dengan kecepatan 2 m/s. Jika plat dipanaskan keseluruhan panjangnya hingga mencapai suhu 60°C , hitunglah panas yang dipindahkan pada (a) 20 cm pertama plat, dan (b) 40 cm pertama plat.



KONVEKSI BEBAS (*NATURAL CONVECTION*)

Konveksi yang terjadi karena proses pemanasan yang menyebabkan fluida berubah densitasnya (kerapatannya) dan bergerak naik

Gerakan fluida dalam konveksi bebas terjadi karena gaya *bouyancy* (apung) yang dialaminya apabila kerapatan fluida di dekat permukaan perpindahan kalor berkurang sebagai akibat proses pemanasan.



➤ PLAT/SILINDER VERTIKAL

Bilangan Grashoff :
$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta (T_w - T_\infty) L^3}{\nu^2}$$

dimana : g = percepatan gravitasi
 ν = viskositas kinematik
 $\beta = 1/T =$ koefisien ekspansi volume (K^{-1})

Koefisien perpindahan kalor dievaluasi dari :

$$q_w = h A (T_w - T_\infty)$$

Koefisien perpindahan kalor konveksi bebas rata-rata untuk berbagai situasi dinyatakan dalam bentuk :

$$\overline{Nu}_f = C (Gr_f Pr_f)^m = \frac{\overline{h} L}{k}$$

f menunjukkan bahwa sifat-sifat untuk gugus tak berdimensi dievaluasi pada suhu film :

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2}$$



Gr.Pr = Ra (Bilangan Rayleigh)

Harga C dan m dapat dilihat pada tabel :

Jenis Aliran	Gr.Pr (Ra)	C	M
Laminar	$10^4 - 10^9$	0,59	$\frac{1}{4}$
	$10^9 - 10^{13}$	0,10	$\frac{1}{3}$

Korelasi yang lebih rumit diberikan oleh Churchill dan Chu :

$$\overline{Nu} = 0,68 + \frac{0,670 Ra^{1/4}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \longrightarrow \text{untuk } 10^{-1} < Ra_L < 10^9$$

$$\overline{Nu}^{1/2} = 0,825 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \longrightarrow \text{untuk } 10^{-1} < Ra_L < 10^{12}$$



∞ PLAT HORIZONTAL

Plat horizontal dengan permukaan panas menghadap ke atas :

$$\overline{Nu}_L = 0,13 (Gr_L Pr)^{1/3} \longrightarrow \text{untuk } Gr_L \cdot Pr < 2 \times 10^8$$

$$\overline{Nu}_L = 0,16 (Gr_L Pr)^{1/3} \longrightarrow \text{untuk } 2 \times 10^8 < Gr_L \cdot Pr < 10^{11}$$

Plat horizontal dengan permukaan panas menghadap ke bawah :

$$\overline{Nu}_L = 0,58 (Gr_L Pr)^{1/5} \longrightarrow \text{untuk } 10^6 < Gr_L \cdot Pr < 10^{11}$$

Jangan lupa bahwa :

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k}$$

$$q = \bar{h} A (T_w - T_\infty)$$

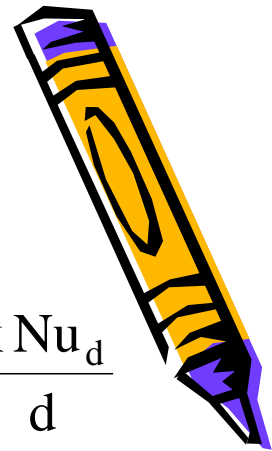


∞ SILINDER HORIZONTAL

$$Gr_d = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)d^3}{\nu^2} \longrightarrow Nu_d = 0,53 (Gr_d Pr)^{1/4}$$

$$\frac{q}{L} = h \pi d (T_w - T_\infty)$$

$$h = \frac{k Nu_d}{d}$$



∞ KONVEKSI BEBAS DARI BOLA

Nilai Nusselt rata-rata untuk bola isothermal ke udara :

$$Nu_f = \frac{\bar{h} d}{k_f} = 2 + 0,392 Gr_f^{1/4} \longrightarrow \text{untuk } 1 < Gr_f < 10^5$$

Dengan memasukkan angka Prandtl diperoleh :

$$Nu_f = 2 + 0,43 (Gr_f Pr_f)^{1/4}$$

Untuk rentang yang lebih tinggi :

$$Nu_f = 2 + 0,50 (Gr_f Pr_f)^{1/4} \longrightarrow \text{untuk } 3 \times 10^5 < Gr Pr < 8 \times 10^8$$



PERPINDAHAN PANAS RADIASI

Radiasi \cong pancaran \cong sinaran \cong ilian

Radiasi thermal \rightarrow *radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh suatu benda karena suhunya.*

Radiasi selalu merambat dengan kecepatan cahaya, 3×10^{10} cm/s. Kecepatan ini sama dengan hasil perkalian panjang gelombang dengan frekuensi radiasi :

$$c = \lambda \nu$$

dimana : c = kecepatan cahaya

λ = panjang gelombang (= 10^{-8} cm)

ν = frekuensi

Perambatan radiasi thermal berlangsung dalam bentuk kuantum dan setiap kuantum mengandung energi sebesar

$$E = h \nu$$

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

Setiap kuantum dianggap sebagai suatu partikel yang mempunyai energi, massa dan momentum seperti molekul gas \rightarrow photon

Sehingga, pd hakekatnya radiasi merupakan pancaran yg disebabkan oleh gas photon yang mengalir dari satu tempat ke tempat lain.

Dengan teori relativitas dan thermodinamika statistik maka akan diperoleh suatu rumus yang disebut Hukum Stefan-Boltzmann dimana energi total yang dipancarkan oleh suatu benda sebanding dengan pangkat empat suhu absolut :

$$E_b = \sigma T^4$$

Dilihat dari **daya emisinya**, benda terbagi ke dalam 3 macam :

1. Benda putih sempurna (*absolutely white*)

→ menyerap sinar, tanpa mengemisikan kembali.

$$\text{Emisivitas } (\varepsilon) = 0$$

2. Benda abu-abu (*gray body*)

$$0 < \varepsilon < 1$$

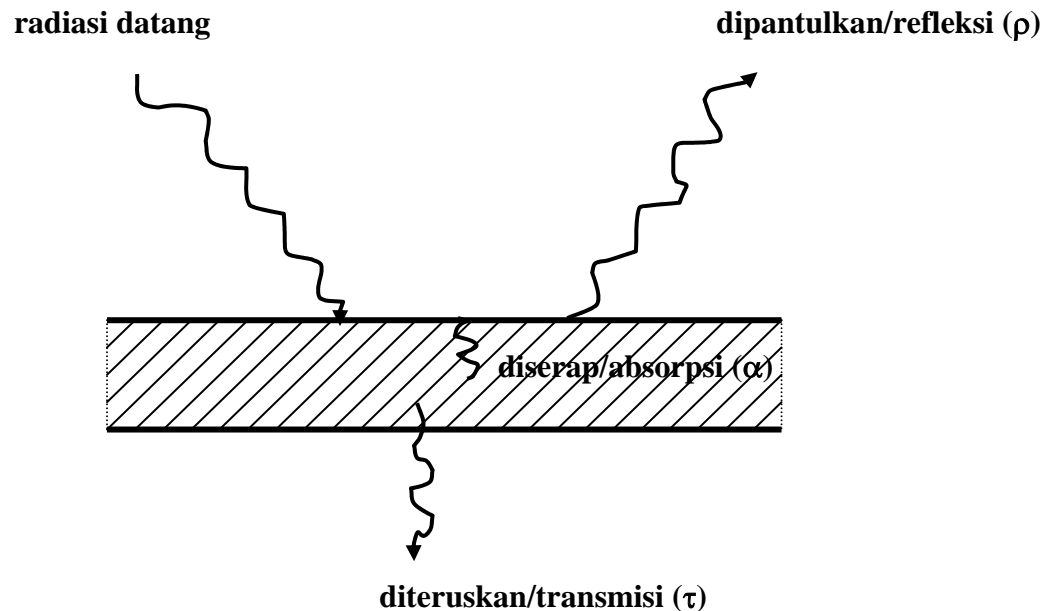
3. Benda hitam (*blackbody*)

→ menyerap 100%, mengemisikan 100%.

$$\text{Emisivitas } (\varepsilon) = 1$$

SIFAT-SIFAT RADIASI

Sifat-sifat benda yang menerima energi radiasi :



ρ = faktor refleksi (*refleksivitas*)

α = faktor absorpsi (*absorpsivitas*)

τ = faktor transmisi (*transmisivitas*)

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

Kebanyakan benda padat tidak meneruskan radiasi thermal, $\tau = 0$, sehingga

$$\rho + \alpha = 1$$

Sifat-sifat radiasi benda,

1. Benda yang sifatnya dapat menyerap energi yang datang seluruhnya (100%) disebut benda hitam (*blackbody*)

$$\alpha = 1 \quad ; \quad \rho = 0$$

Emisi benda hitam, $\varepsilon = 1 \rightarrow \varepsilon = \alpha = 1$

2. Benda yang dapat memantulkan energi yang datang 100% disebut benda putih sempurna (*absolutely white*)

$$\rho = 1 \quad ; \quad \alpha = 0$$

3. Benda yang diantara black body dan white body disebut benda abu-abu (*grey body*)

$$0 < \varepsilon < 1$$

IDENTITAS KIRCHHOFF

Emisivitas (ϵ) suatu benda sama dengan absorpsivitas (α)-nya pada suhu yang sama

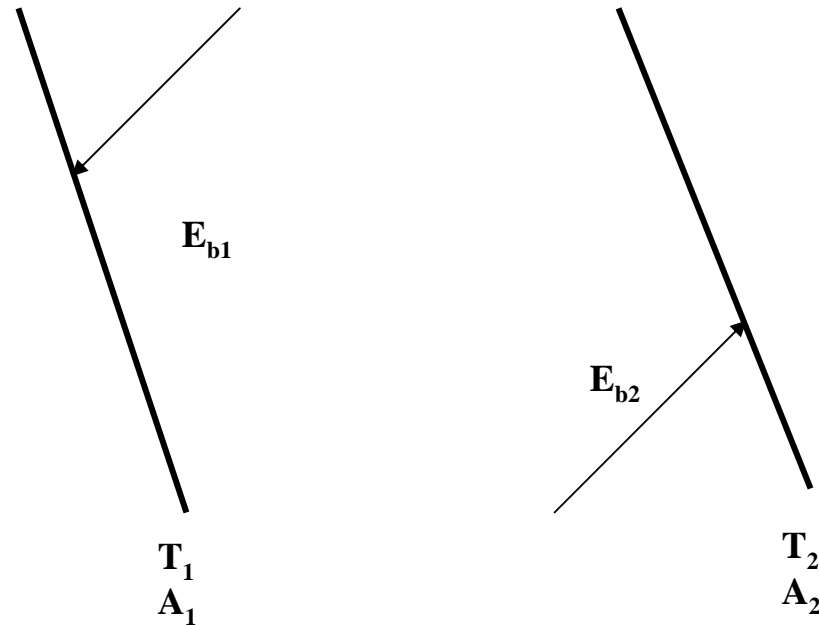
Emisivitas suatu benda (ϵ) \rightarrow perbandingan antara energi yang dapat dipancarkan oleh benda itu pada suhu T dibandingkan dengan energi yang dipancarkan oleh benda hitam pada suhu yang sama

$$\epsilon = \frac{E}{E_b}$$

Energi yang dipancarkan oleh suatu benda selalu lebih kecil dari energi yang dipancarkan oleh benda hitam sehingga harga $\epsilon \leq 1$.

FAKTOR PANDANGAN (F_{m-n})

- ❑ Faktor bentuk (*shape factor*)
- ❑ Faktor pandang (*view factor*)
- ❑ Faktor sudut (*angle factor*)
- ❑ Faktor konfigurasi (*configuration factor*)
- ❑ Faktor geometris (*geometry factor*)



Pertukaran energi antara dua permukaan yang mempunyai suhu yang berlainan

Permukaan 1 dan permukaan 2 saling meradiasi → energi di permukaan 1 bisa sampai di permukaan 2 dan sebaliknya.

F_{1-2} = fraksi energi yang meninggalkan permukaan 1 dan diterima oleh permukaan 2.

F_{2-1} = fraksi energi yang meninggalkan permukaan 2 dan diterima oleh permukaan 1

F_{m-n} = fraksi energi yang meninggalkan permukaan m dan diterima oleh permukaan n

Energi yang meninggalkan permukaan 1 dan sampai di permukaan 2 adalah : $E_{b1}A_1F_{12}$

Energi yang meninggalkan permukaan 2 dan sampai di permukaan 1 adalah : $E_{b2}A_2F_{21}$

Pertukaran energi nettoanya adalah :

$$q_{1-2} = E_{b1}A_1F_{12} - E_{b2}A_2F_{21}$$

Pada 2 permukaan m dan n berlaku hubungan resiprositas

$$A_m F_{mn} = A_n F_{nm}$$

Sehingga pertukaran kalor nettoanya menjadi :

$$q_{1-2} = A_1 F_{12} (E_{b1} - E_{b2}) = A_2 F_{21} (E_{b1} - E_{b2})$$

HUBUNGAN BERBAGAI FAKTOR BENTUK

Benda-benda tidak bisa memandang dirinya sendiri :

$$F_{11} = F_{22} = F_{33} = \dots = 0$$

Jika F_{ij} adalah fraksi energi total yang meninggalkan permukaan i dan sampai di permukaan j maka :

$$\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1$$

Untuk lengkung tiga permukaan dapat kita tuliskan :

$$F_{11} + F_{12} + F_{13} = 1$$

$$F_{11} = 0 \quad \longrightarrow \quad F_{13} = 1 - F_{12}$$

$$F_{21} + F_{22} + F_{23} = 1$$

$$F_{22} = 0 \quad \longrightarrow \quad F_{23} = 1 - F_{21}$$

Dari hubungan resiprositas : $A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$

PERTUKARAN KALOR ANTARA BENDA TAK HITAM

Pada perpindahan kalor radiasi antara permukaan hitam, semua energi radiasi yang menimpa permukaan itu diserap.

Pada benda tak hitam, tidak seluruh energi yang jatuh di permukaan diserap; sebagian dipantulkan kembali ke permukaan lain dalam system dan sebagian mungkin dipantulkan keluar system.

Diandaikan semua permukaan bersifat difus (baur, menyebar) dan mempunyai suhu seragam, emisivitas dan reflektivitas konstan di seluruh permukaan.

Didefinisikan :

G = iradiasi

panas radiasi total yang menimpa suatu permukaan sebuah benda per satuan waktu per satuan luas

J = radiositas

panas radiasi total yang meninggalkan suatu permukaan sebuah benda per satuan waktu per satuan luas

Dianggap seluruh permukaan mempunyai G dan J yang sama.

Radiositas → *jumlah energi yang dipancarkan (emisi) dan energi yang dipantulkan (refleksi) apabila tidak ada energi yang diteruskan (transmisi, $\tau = 0$)*

$$\alpha + \rho = 1$$

$$\rho = 1 - \alpha = 1 - \varepsilon$$

sehingga

$$J = \varepsilon E_b + \rho G = \varepsilon E_b + (1 - \varepsilon)G$$

$$G = \frac{J - \varepsilon E_b}{1 - \varepsilon}$$

Energi netto yang meninggalkan permukaan adalah :

$$\begin{aligned} \frac{q}{A} &= J - G \\ &= \varepsilon E_b + (1 - \varepsilon)G - G \\ &= \varepsilon E_b - \varepsilon G \end{aligned}$$

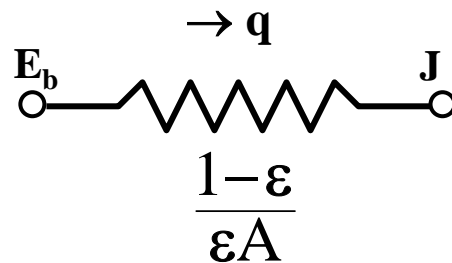
Masukkan persamaan G, akan diperoleh :

$$q = \frac{\varepsilon A}{1 - \varepsilon} (E_b - J)$$

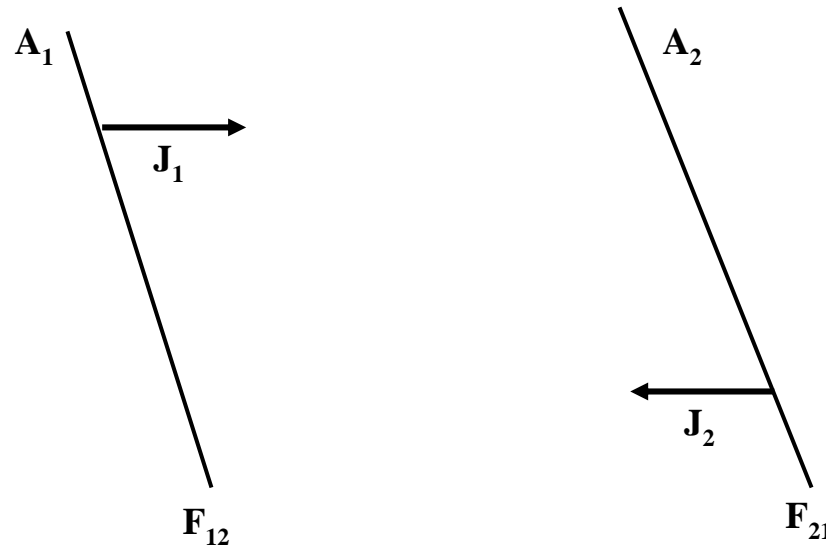
Dari persamaan di atas diperoleh

$$q = \frac{(E_b - J)}{\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon A}} \cong \text{Arus} = \frac{\text{beda potensial}}{\text{tahanan permukaan}}$$

Jaringan permukaan :



Pertukaran energi radiasi antara permukaan A_1 dan A_2



Energi yang meninggalkan permukaan 1 dan mencapai permukaan 2 adalah : $J_1 A_1 F_{12}$

Energi yang meninggalkan permukaan 2 dan mencapai permukaan 1 adalah : $J_2 A_2 F_{21}$

Pertukaran kalor netto antara kedua permukaan adalah

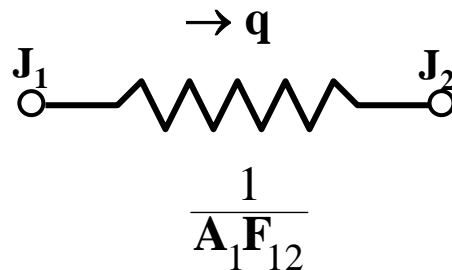
$$q_{12} = J_1 A_1 F_{12} - J_2 A_2 F_{21}$$

Dari hubungan resiprositas : $A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$

Sehingga : $q_{12} = A_1 F_{12} (J_1 - J_2) = A_2 F_{21} (J_1 - J_2)$

$$q = \frac{(J_1 - J_2)}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} \cong \text{Arus} = \frac{\text{beda potensial}}{\text{tahanan ruang}}$$

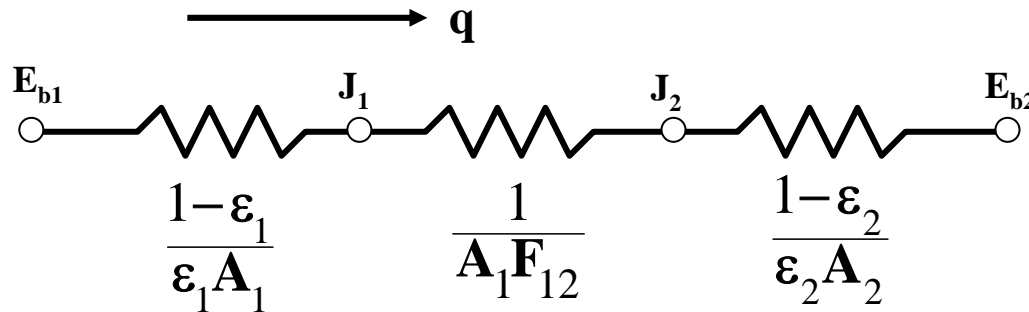
Jaringan ruang



Jaringan radiasi merupakan gabungan antara jaringan permukaan dan jaringan ruang. Kedua unsur jaringan itu merupakan pokok-pokok metode jaringan radiasi (*radiation network method*).

PERPINDAHAN PANAS RADIASI ANTARA DUA PERMUKAAN

Perpindahan panas antara dua permukaan dan tidak ada permukaan lain di lingkungannya



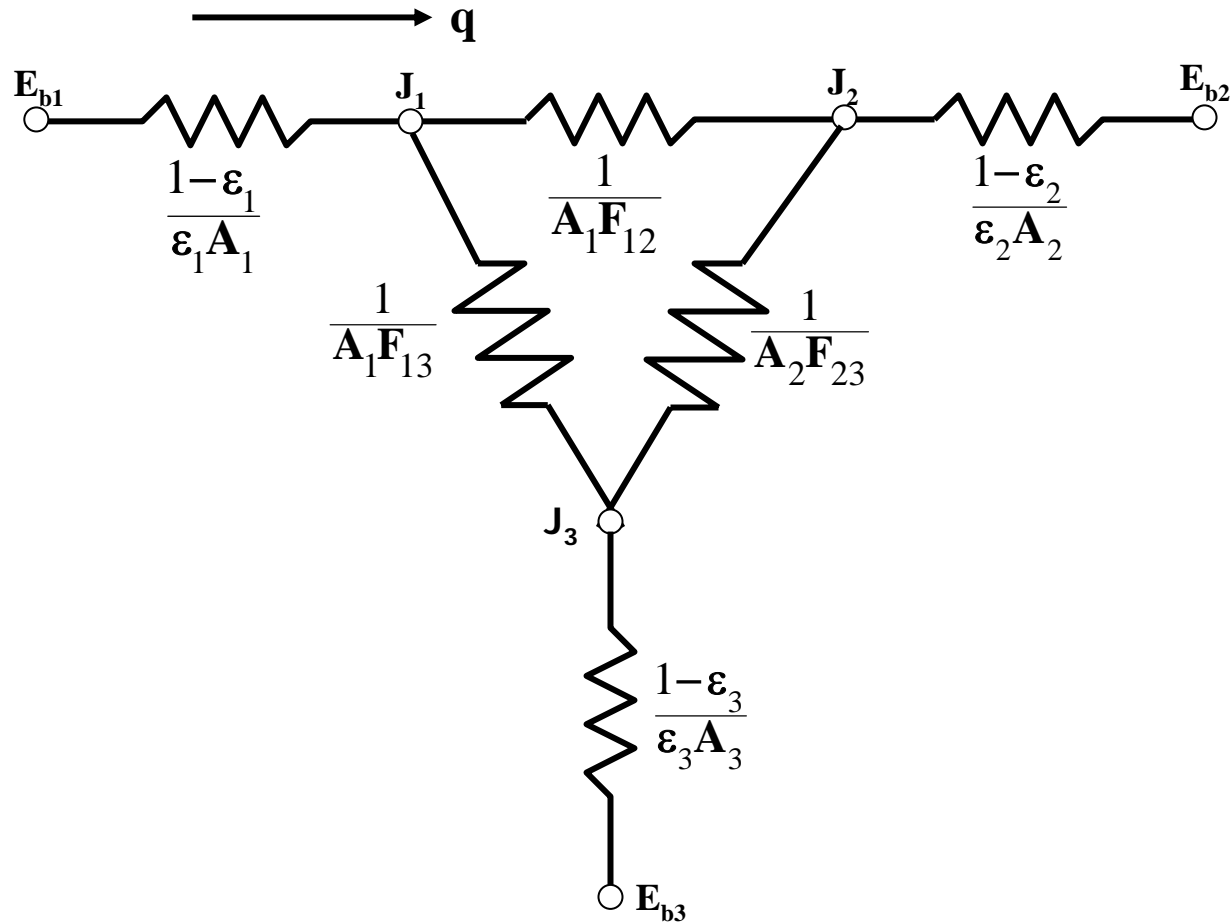
Pertukaran panas nettonya adalah :

$$q_{\text{net}} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\sum R} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \longrightarrow q_{\text{net}} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}$$

Contoh Soal :

Dua buah piring sejajar berdiameter 60 cm, terpisah pada jarak 15 cm. Suhu pada permukaan bagian atas adalah 250 K dan suhu pada permukaan bagian bawah adalah 300 K. Andaikan semua permukaan hitam, berapakah laju perpindahan kalornya ?

PERPINDAHAN PANAS RADIASI ANTARA TIGA PERMUKAAN



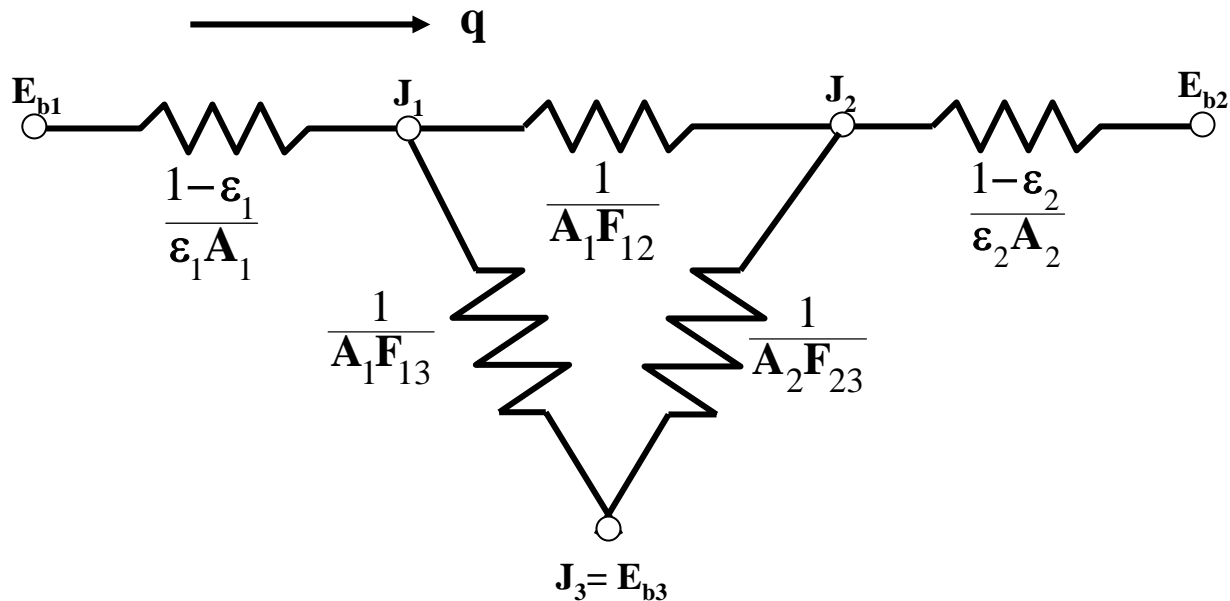
Untuk menghitung perpindahan panas antara tiga benda ini dapat diselesaikan dengan menerapkan hukum arus Kirchhoff : **Jumlah semua arus yang memasuki suatu node ialah nol.**

$$\text{Node I : } \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} + \frac{J_2 - J_1}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} + \frac{J_3 - J_1}{\frac{1}{A_1 F_{13}}} = 0$$

$$\text{Node II : } \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} + \frac{E_{b2} - J_2}{\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} + \frac{J_3 - J_2}{\frac{1}{A_2 F_{23}}} = 0$$

$$\text{Node III: } \frac{J_1 - J_3}{\frac{1}{A_1 F_{13}}} + \frac{J_2 - J_3}{\frac{1}{A_2 F_{23}}} + \frac{E_{b3} - J_3}{\frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 A_3}} = 0$$

**PERPINDAHAN PANAS RADIASI ANTARA DUA
 BIDANG DATAR YANG DIHUBUNGKAN DENGAN
 BIDANG YANG TIDAK DAPAT MENGHANTARKAN
 PANAS TETAPI DAPAT MEMANTULKAN SEMUA
 PANAS YANG DITERIMA**



J_3 tidak dihubungkan dengan tahanan permukaan radiasi karena permukaan 3 tidak bertukaran energi, sehingga

$$J_3 = E_{b3} = \sigma T_3^4$$

Contoh : Dua buah plat yang berada dalam ruangan yang besar.
Karena luas ruang A_3 sangat besar maka tahanan ruang

$$\frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3 A_3} = 0 \quad \text{sehingga } E_{b3} = J_3$$

Untuk menghitung aliran panas pada masing-masing permukaan, kita cari radiositas J_1 dan J_2 dengan menggunakan hukum arus Kirchhoff.

$$\text{Node } J_1 : \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} + \frac{J_2 - J_1}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} + \frac{J_3 - J_1}{\frac{1}{A_1 (1-F_{12})}} = 0$$

$$\text{Node } J_2 : \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} + \frac{E_{b2} - J_2}{\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} + \frac{E_{b3} - J_2}{\frac{1}{A_2 (1-F_{21})}} = 0$$

Panas total yang dilepas plat 1 : $q_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1}}$

Panas total yang dilepas plat 2 : $q_2 = \frac{E_{b2} - J_2}{\frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}}$

Panas yang diterima dinding kamar :

$$q_3 = q_1 + q_2$$

atau $q_3 = \frac{J_1 - J_3}{\frac{1}{A_1 F_{13}}} + \frac{J_2 - J_3}{\frac{1}{A_2 F_{23}}} = \frac{J_1 - E_{b3}}{\frac{1}{A_1 (1 - F_{12})}} + \frac{J_2 - E_{b3}}{\frac{1}{A_2 (1 - F_{21})}}$

Contoh Soal :

Dua buah plat sejajar, ukuran $0,5 \times 1,0$ m berjarak $0,5$ m satu sama lain. Plat yang satu dipelihara pada suhu 1000°C dan yang satu lagi pada 500°C . Emisivitas plat itu masing-masing $0,2$ dan $0,5$. Kedua plat itu terletak di dalam sebuah ruang yang sangat besar yang dinding-dindingnya dipelihara pada suhu 27°C . Kedua plat itu saling bertukaran kalor satu sama lain. Tentukan perpindahan netto ke setiap plat dan ke ruang !
