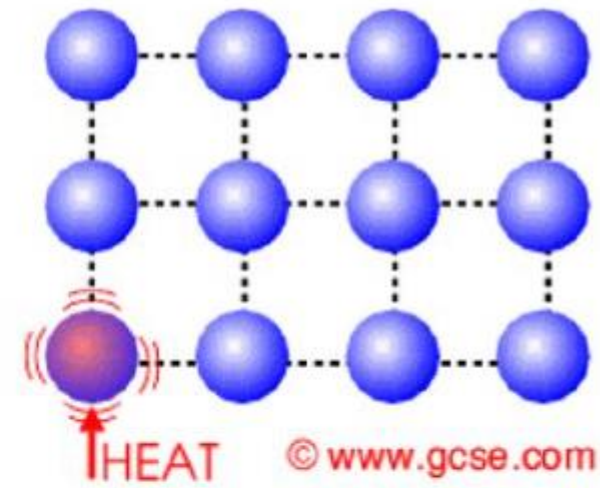
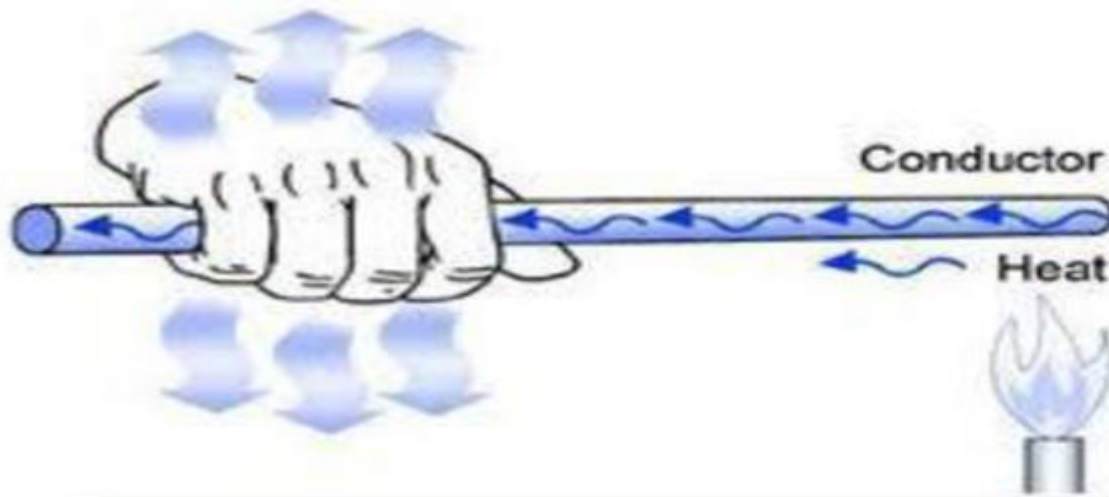




Heat Conduction Equation

Pertemuan : 5
Perpindahan Panas Dasar



Pengertian Konduksi

Konduksi ialah pemindahan panas yang dihasilkan dari kontak langsung antara permukaan-permukaan benda. Setiap benda mempunyai konduktivitas termal (kemampuan mengalirkan panas) tertentu yang akan mempengaruhi panas yang diantarkan dari sisi yang panas ke sisi yang lebih dingin.



Koefisien Konduksi Termal



- Sifat bahan yang digunakan utk menyatakan bahwa bahan tersebut merupakan suatu isolator atau konduktor.
- Menunjukkan seberapa cepat kalor mengalir dalam suatu bahan.

$$(k_{\text{konduktor}} > k_{\text{isolator}})$$



Tabel 7.4 Konduktifitas Termal Beberapa Zat

Zat / Bahan	$J.m^{-1}.s^{-1}.K^{-1}$	Zat / Bahan	$J.m^{-1}.s^{-1}.K^{-1}$
<i>Logam :</i>		<i>Zat cair :</i>	
Perak	$4,2 \times 10^{-1}$	Air	$5,7 \times 10^{-4}$
Tembaga	$3,8 \times 10^{-1}$	<i>Bahan isolator :</i>	
Aluminium	$2,1 \times 10^{-1}$	Serbuk gergajian	$5,9 \times 10^{-5}$
Kuningan	$1,0 \times 10^{-2}$	Gabus	4×10^{-5}
Besi/baja	$4,6 \times 10^{-2}$	Wol gelas	$3,9 \times 10^{-5}$
<i>Zat padat lain :</i>		Kapuk	$3,5 \times 10^{-5}$
Beton	$1,7 \times 10^{-3}$	<i>Gas :</i>	
Kaca	$8,0 \times 10^{-4}$	Hidrogen	$1,7 \times 10^{-4}$
Batu bata	$7,1 \times 10^{-4}$	Udara	$2,3 \times 10^{-5}$
Kayu cemara	$1,2 \times 10^{-4}$		

Hukum Fourier



$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Dimana:

q = laju perpindahan panas

dT/dX = gradien suhu ke arah
perpindahan panas

$$\frac{dQ}{dt} = q = - \frac{dT}{\frac{dx}{kA}}$$



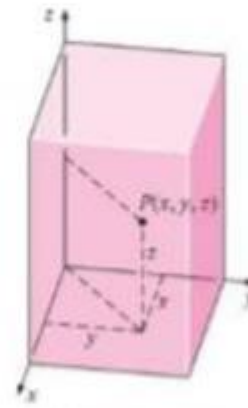
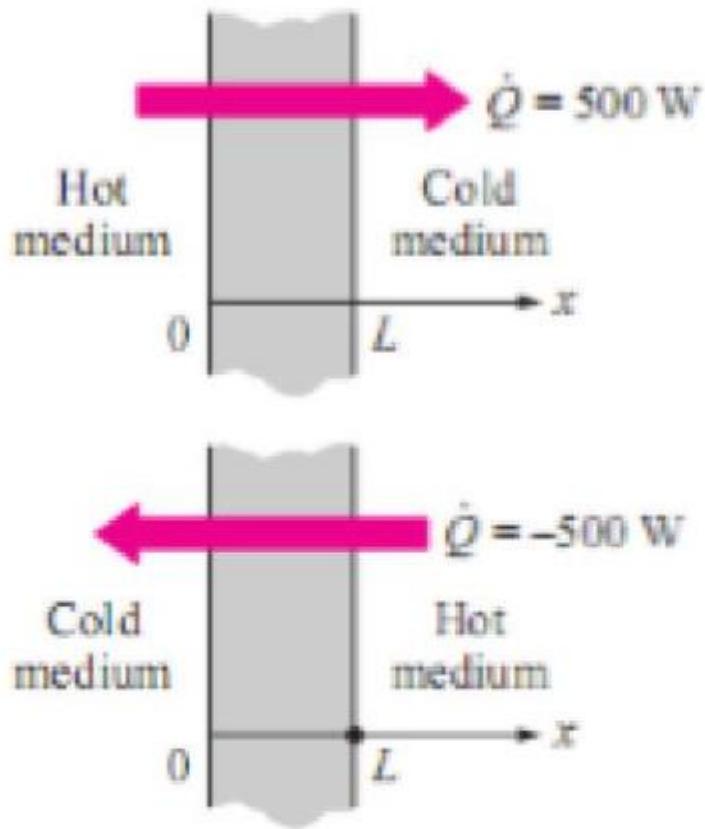
Dalam persamaan tersebut Hukum Fourier telah dinyatakan dalam bentuk persamaan laju alir, yang bentuk umumnya adalah:

$$\text{Laju alir} = \frac{\text{tenaga pendorong}}{\text{tahanan}}$$

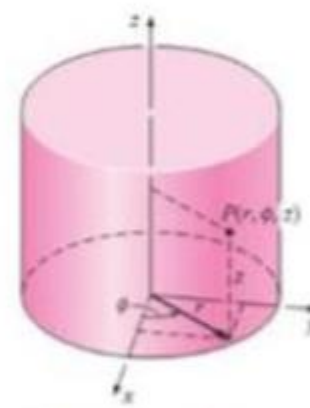
Dengan demikian persamaan konduksi panas mendefinisikan tahanan terhadap konduksi panas k adalah konduktiviti panas suatu zat, yang besarnya tergantung pada temperatur zat itu.



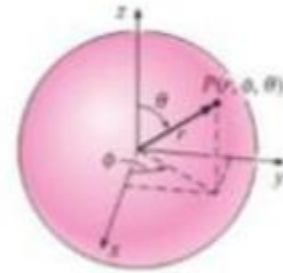
KONDUKSI



(a) Rectangular coordinates



(b) Cylindrical coordinates



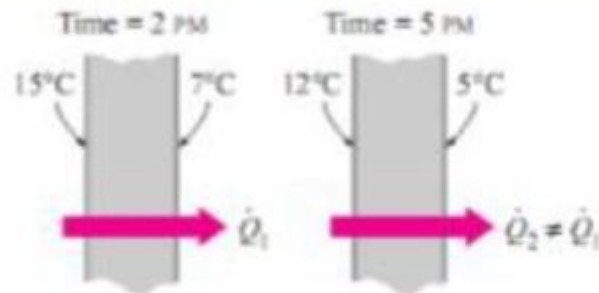
(c) Spherical coordinates

Arah perpindahan panas
1 dimensi

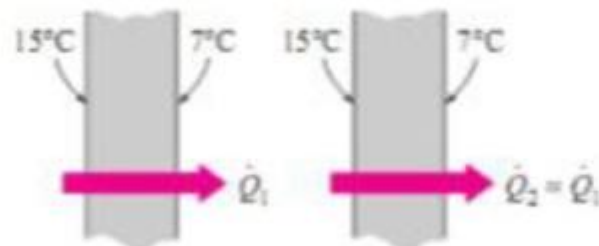
Lokasi titik perpindahan panas pada
berbagai macam sistem koordinat



Perpindahan Panas Steady vs Transient



(a) Transient



(b) Steady-state

Transient

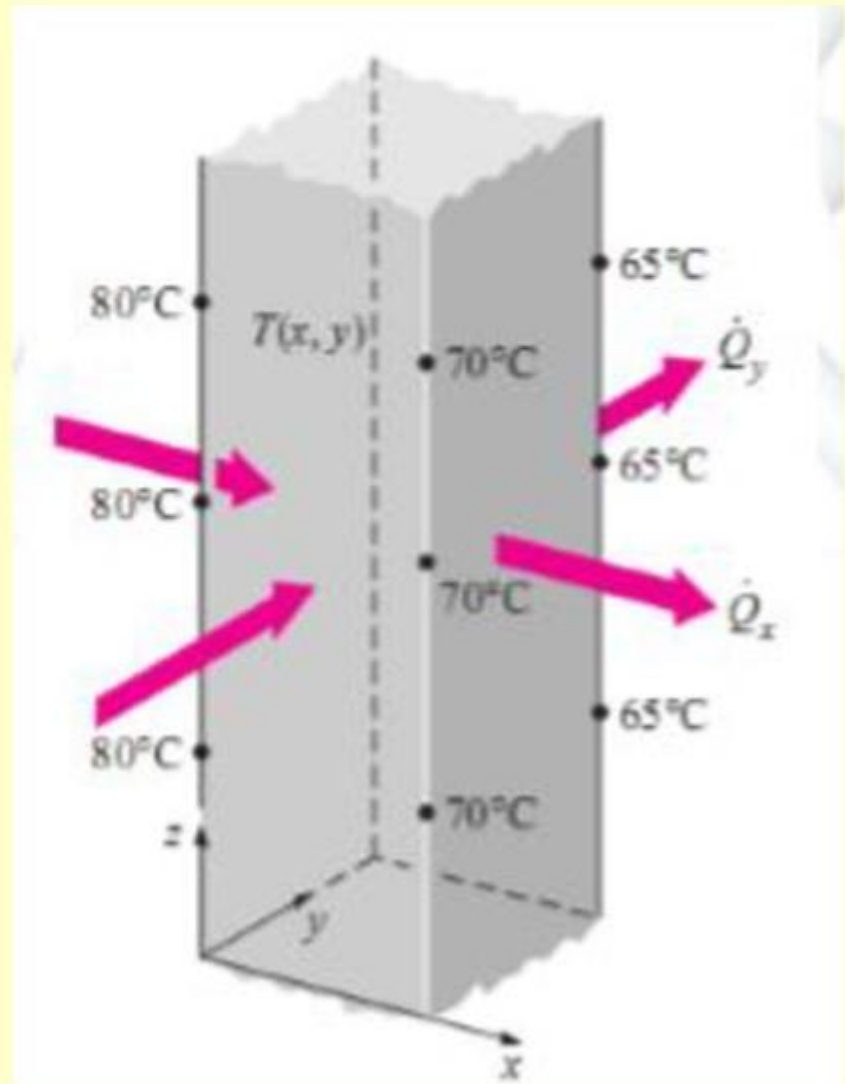
Steady state

Dipengaruhi/tergantung pada perubahan waktu

Tidak dipengaruhi/tidak tergantung pada perubahan waktu padaa setiap titik perpindahan panas pada mediumnya.

Perpindahan Panas Multi-dimensi

Arah perpindahan panas 1 dimensi
Perpindahan Panas Pada 2 Dimensi
Pada Medium Berbentuk Kotak.



Konduksi Keadaan Steady (Tunak)



Persamaan neraca energi:

$$\left[\begin{array}{c} \text{energi} \\ \text{masuk} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{energi yang dibangkitkan} \\ \text{di dalam unsur} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{perubahan energi} \\ \text{dalam/akumulasi} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{energi} \\ \text{luar} \end{array} \right]$$



Kualitas energi panas adalah sebagai berikut:

Energi masuk: $q_x = -k \cdot A \frac{dT}{dx}$

Energi yang dibangkitkan: $q_{gen} = q \cdot A \cdot dx$

Perubahan energi dalam $= \rho \cdot C_p \cdot A \frac{dT}{dt} \cdot dx$

Energi keluar $= q_{x+dx} = -k \cdot A \frac{dT}{dx} |_{x+dx}$

Pada keadaan steady, distribusi suhu konstan, suhu hanya merupakan fungsi posisi dan akumulasi = 0, sehingga:

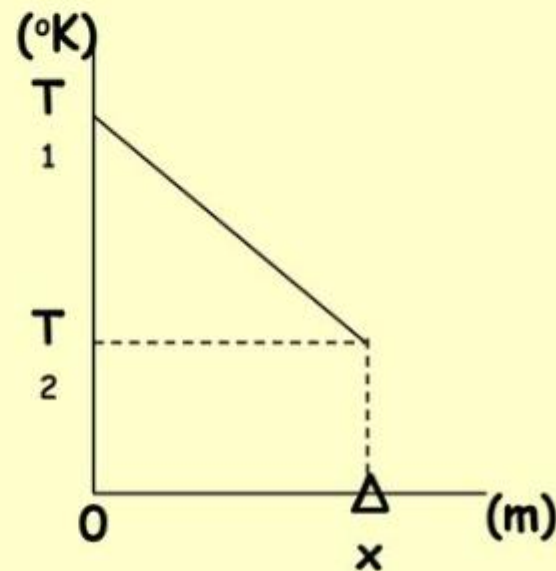
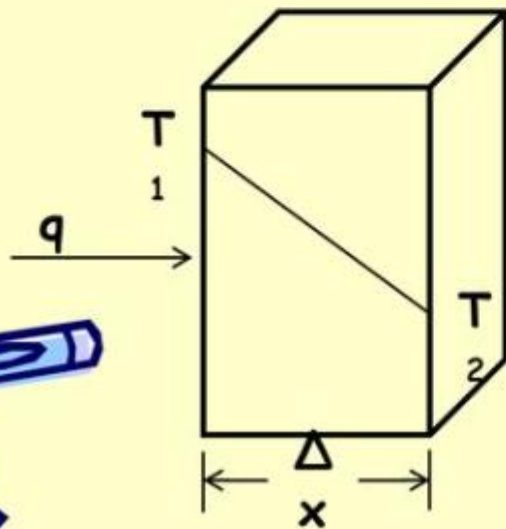
$$q_x = q_{x+dx}$$



Untuk konduksi keadaan steady,
hukum Fourier dapat diintegrasi:

$$\frac{q}{A} \int_{x_1}^{x_2} dx = -k \int_{T_1}^{T_2} dT$$

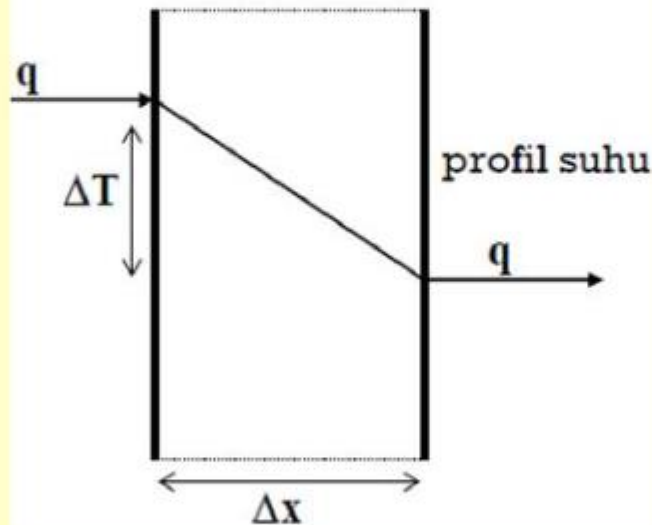
$$\frac{q}{A} = - \frac{k}{(x_2 - x_1)} (T_1 - T_2)$$



DINDING DATAR



Perpindahan Panas Konduksi Pada Satu Bidang Datar (Slab)



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




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

Keterangan :

q = Laju perpindahan Panas
(W)

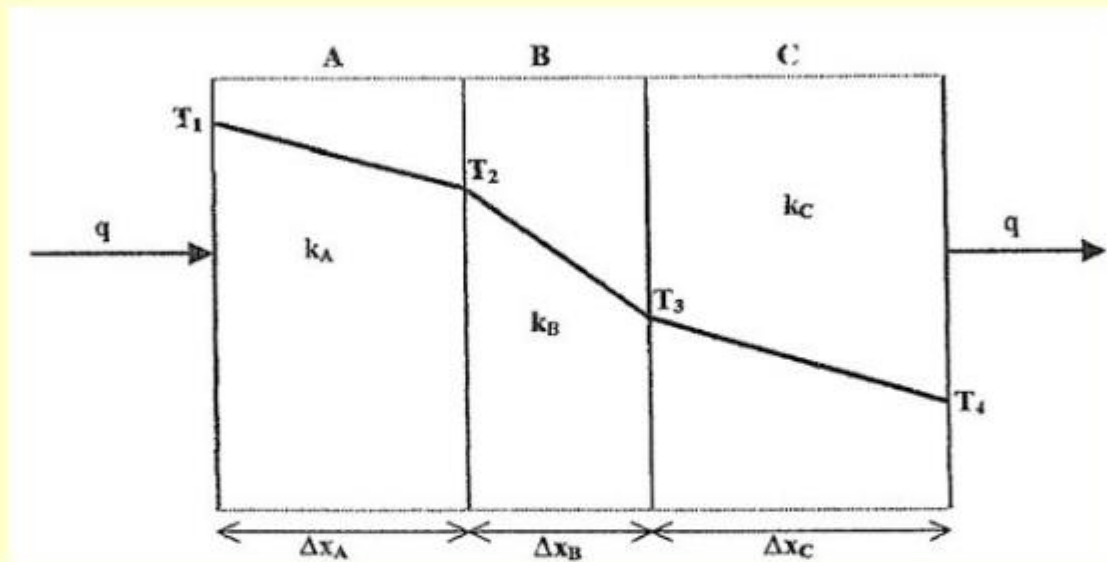
T = Temperature ($^{\circ}\text{C}$)

Δx = Tebal Bahan (m)

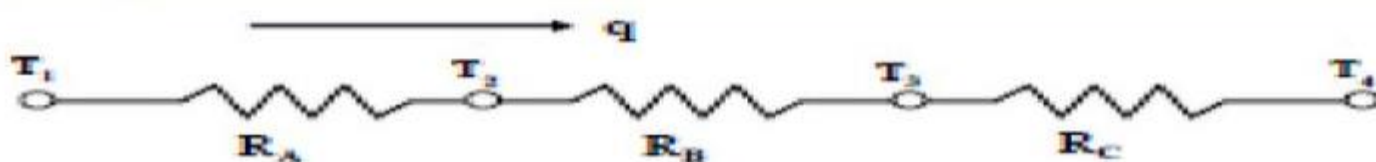
A = Luas Permukaan (m^2)



Perpindahan Panas Konduksi Pada Satu Seri Bahan



Analogi listrik yang disusun secara seri :





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,

$$q = q_A = q_B = q_C$$

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

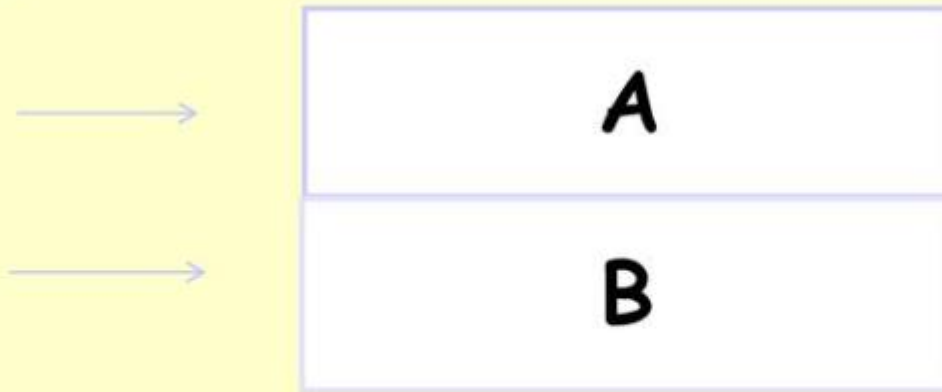
$$q_A = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x_A}{k_A A}}$$

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

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



Arah aliran bila disusun
paralel :



$$q_r = q_A + q_B = k_A \cdot A_A \frac{T_1 - T_2}{\Delta_{XA}} + k_B \cdot A_B \frac{T_3 - T_4}{\Delta_{XB}}$$



Contoh soal :

Suhu pada satu dinding gabus setebal 10 cm sebesar 21°C dan pada sisi lainnya -12°C . Konduktivitas termal pada rentang suhu ini $0,042\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$. Hitunglah laju perpindahan panas melalui dinding seluas 1 m^2 .

Jawab :

Diket :

$$T_1 = 21^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = -12^{\circ}\text{C}$$

$$K = 0,042\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

$$A = 1\text{ m}^2$$

$$\Delta x = 10\text{ cm} = 0,1\text{ m}$$

Ditanya : q ?



Penyelesaian:

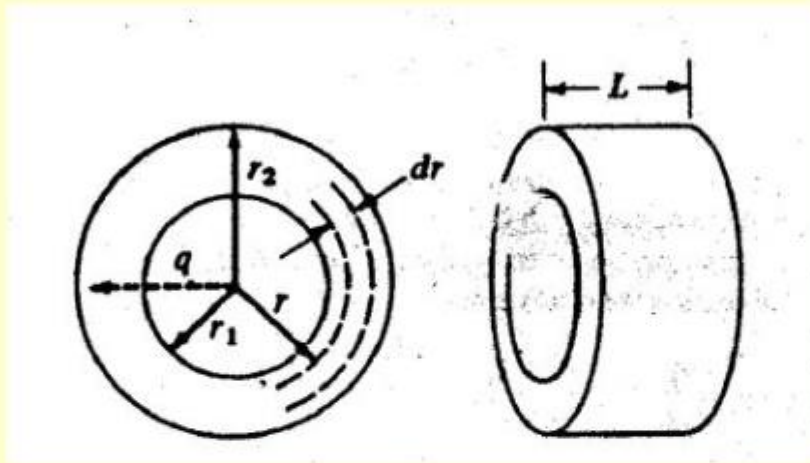
$$q = -KA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$q = -0,042 \text{ w/m}^{\circ}\text{C} \cdot 1 \text{ m}^2 \frac{(-12 - 21)^{\circ}\text{C}}{0,1 \text{ m}}$$

$$q = 13,86 \text{ W}$$



Sistem Radial-Silinder



Suatu silinder, dimana:

r_1 = jari-jari dalam

r_0 = jari-jari luar

L = panjang

$T_i - T_o$ = beda suhu

- Laju perpindahan panas dapat ditentukan dari Hukum Fourier dengan penyesuaian rumus luas menjadi:

$$A_r = 2\pi rL$$

$$q_r = -k.A_r \frac{dT}{dr}$$

$$\int_{r_1}^{r_o} \frac{dr}{r} = \frac{2\pi.k.L}{q} \int_{T_0}^{T_1} dT$$

$$\ln r_o - \ln r_1 = \frac{2\pi.k.L}{q} (T_1 - T_0)$$

$$q = \frac{2\pi.k.L}{\ln(r_o/r_1)} (T_1 - T_0)$$



$$q = k \cdot A_{lm} \cdot \frac{T_1 - T_2}{r_2 - r_1} = \frac{T_1 - T_2}{(r_2 - r_1) / (k A_{lm})} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

Dimana : $A_{lm} = \frac{(2\pi L r_2) - (2\pi L r_1)}{\ln(2\pi L r_2 / 2\pi L r_1)} = \frac{A_2 - A_1}{\ln(A_2 / A_1)}$

Dimana : $R = \frac{r_2 - r_1}{k_A \cdot A_{lm}} = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi k L}$

(Geankoplis, 1987)

Contoh 4.2-1 (Geankoplis, 1987).

Panjang tabung untuk koil pendingin

Tabung silinder berdinding tipis dari karet dengan ID 5 mm dan OD 20 mm digunakan sebagai koil pendingin. Air pendingin dalam tabung mengalir pada suhu 274,9 K. Sebanyak 14,65 W panas harus dipindahkan dengan pendinginan ini. Hitung panjang tabung yang diperlukan, jika suhu permukaan luar tabung 297,1 K.



Penyelesaian:

- Dari App. A-3 Geankoplis, 1987:
- $K_{\text{hardbutter}} = 0,151 \text{ W/m.K}$
- $r_1 = 5/100 = 0,005 \text{ m}$; $r_2 = 20/1000 = 0,02 \text{ m}$
- Ambil $L = 1 \text{ m}$.

$$A_1 = 2\pi L r_1 = 2\pi(1)(0,005) = 0,0314 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 2\pi L r_2 = 0,1257 \text{ m}^2$$



$$A_{rata-rata} = \frac{A_2 - A_1}{\ln(A_2 / A_1)} = 0,0680m^2$$

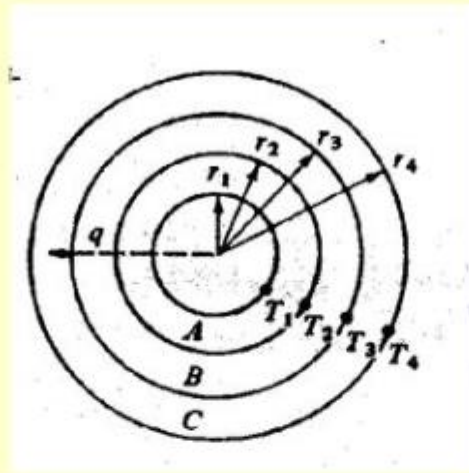
$$q = k.A_{rata-rata} \cdot \frac{T_1 - T_2}{r_2 - r_1} = 0,151(0,0682) \left(\frac{274,9 - 297,1}{0,02 - 0,005} \right) = -15,2W$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa arah aliran panas adalah dari r2, dinding luar ke r1, dinding dalam.

Panjang tabung yang diperlukan:

$$= \frac{14,65W}{15,2W / 1m} = 0,964m$$





Konsep tahanan termal dapat juga digunakan untuk dinding lapis rangkap seperti gambar di atas:

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

Contoh 4.3-1 (Geankoplis, 1987).

Aliran panas melalui dinding isolasi ruang pendingin

- Ruang pendingin dilapisi dengan 12,7 mm kayu *pine*; 101,6 mm *cork board* dan lapisan terluar 76,2 mm *concrete*.
- Temperatur permukaan luar 255,4 K (ruang pendingin) dan permukaan luar *concrete* 297,1 K.
- Nilai:
 - $k_{\text{pine}} = 0,151 \text{ W/m.K}$
 - $k_{\text{corkboard}} = 0,0433 \text{ W/m.K}$
 - $k_{\text{concrete}} = 0,762 \text{ W/m.K}$
- Hitung panas yang hilang (dalam W) untuk 1 m^2 , dan temperatur antara pine dan cork board.



Penyelesaian:

$$T_1 = 255,4 \text{ K}; T_4 = 297,1 \text{ K};$$

$$k_A = 0,151 \text{ ; } x_A = 0,0127 \text{ m}$$

$$k_B = 0,0433 \text{ ; } x_B = 0,1016 \text{ m}$$

$$k_C = 0,762 \text{ ; } x_C = 0,0762 \text{ m}$$

Tahanan masing-masing material:

$$R_A = \frac{\Delta x_A}{k_A \cdot A} = \frac{0,0127}{0,151(1)} = 0,0841 \text{ K / W}$$



Dengan cara yang sama:

$$R_B = 2,346 K/W$$

$$R_C = 0,1 K/W$$

$$q = \frac{T_1 - T_4}{R_A + R_B + R_C} = \frac{255,4 - 297,1}{0,0841 + 2,346 + 0,1} = -16,48 W$$

Untuk menghitung temperatur T_2 , antara *pine* dan *cork board*:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_A}$$

$$-16,48 = \frac{255,4 - T_2}{0,0841}; T_2 = 256,79 K$$



Contoh 4.3-2 (Geankoplis, 1987).

Panas yang hilang dari isolasi pipa.

- Pipa stainless steel berdinding tipis (A) mempunyai $k = 21,63 \text{ W/m.K}$ dengan $ID = 0,0254 \text{ m}$ dan $OD = 0,0508 \text{ m}$. Pipa dilapisi asbestos (B) sebagai isolasi setebal $0,0254 \text{ m}$ dengan $k = 0,2433 \text{ W/m.K}$. Temperatur permukaan dalam pipa 811 K dan permukaan luar isolasi $310,8 \text{ K}$. Untuk pipa $0,305 \text{ m}$ panjang, hitung:
 - Panas yang hilang
 - Temperatur antara pipa dengan isolasi



Penyelesaian:

- $T_1 = 811 \text{ K}$; $T_2 = T \text{ antara}$; $T_3 = 310,8 \text{ K}$

$$r_1 = D/2 = \frac{0,0254}{2} = 0,0127; r_2 = 0,0254; r_3 = r_2 + 0,0254 = 0,0508 \text{ m}$$

- Luas permukaan pada $L = 0,305 \text{ m}$:

$$A_1 = 2\pi L r_1 = 2\pi(0,305)(0,0127) = 0,0243 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 2\pi L r_2 = 0,0487 \text{ m}^2$$

$$A_3 = 2\pi L r_3 = 0,0974 \text{ m}^2$$



$$A_{A,rata-rata} = \frac{A_2 - A_1}{\ln(A_2 / A_1)} = 0,0351 m^2$$

$$A_{B,rata-rata} = \frac{A_3 - A_2}{\ln(A_3 / A_2)} = 0,0703 m^2$$

Tahanan masing-masing:

$$R_A = \frac{r_2 - r_1}{k_A \cdot A_{lm}} = \frac{0,0127}{21,63(0,0351)} = 0,01637 K / W$$

$$R_B = \frac{r_3 - r_2}{k_B \cdot A_{B,lm}} = \frac{0,0254}{0,2423(0,0703)} = 1,491 K / W$$



- Laju perpindahan panas:

$$q = \frac{T_1 - T_3}{R_A + R_B} = \frac{811 - 310,8}{0,01673 + 1,491} = 331,7W$$

- Untuk menghitung temperatur T_2 :

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_A}$$

$$331,7 = \frac{811 - T_2}{0,01673}; T_2 = 805,5K$$

- Hanya terjadi penurunan T yang kecil melintasi pipa, karena nilai k yang tinggi.

