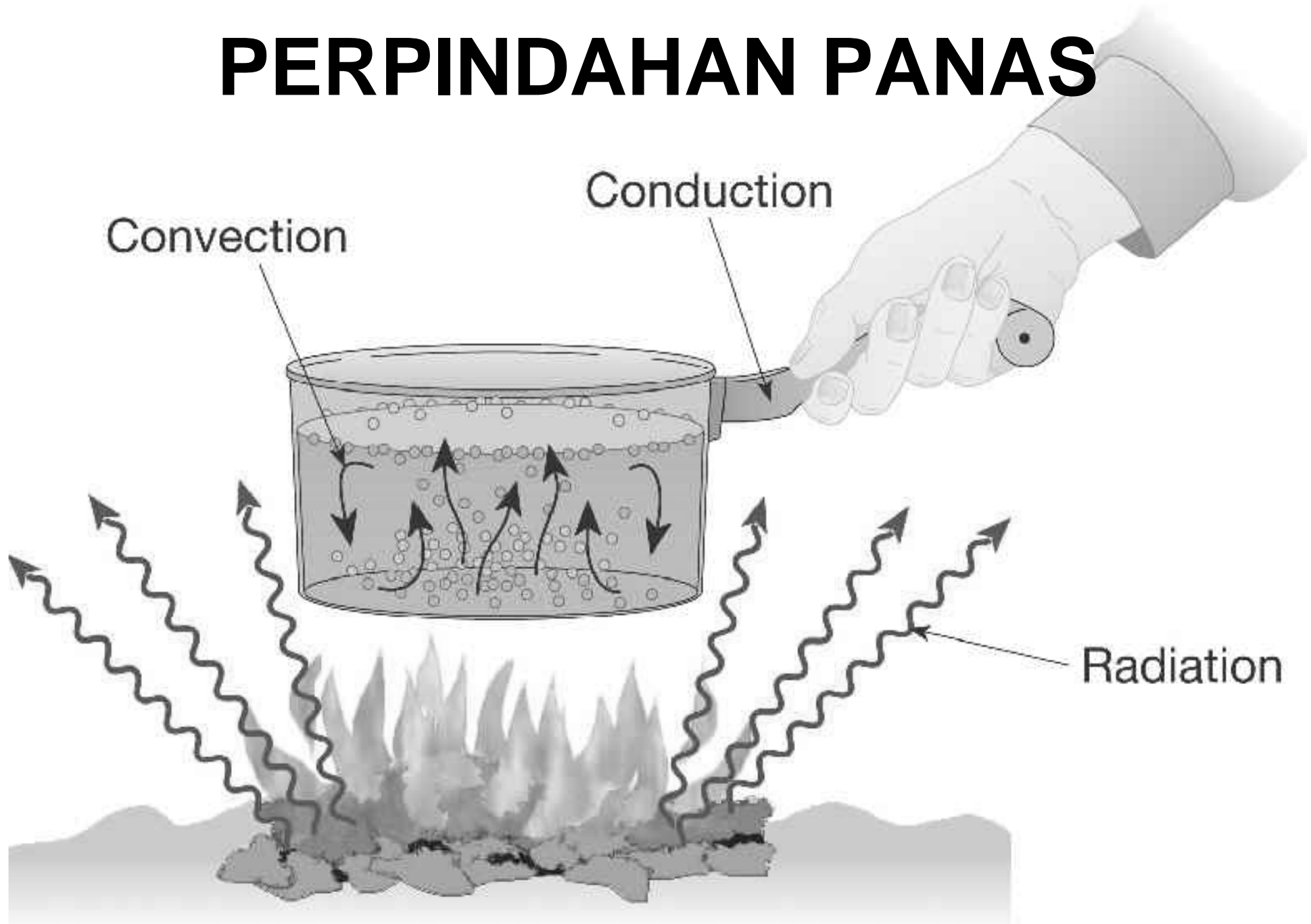


PERPINDAHAN PANAS



- Panas berpindah dari objek yang bersuhu lebih tinggi ke objek lain yang bersuhu lebih rendah
- *Driving force* → perbedaan suhu
- Laju perpindahan = *Driving force*/resistensi
- Proses bisa *steady state* (suhu tetap) dan *unsteady state* (suhu berubah menyebabkan laju pindah panas berubah)
- 3 cara : konduksi, konveksi, radiasi

K O N D U K S I

- energi molekuler dipindahkan secara langsung antar molekul
- Persamaan Fourier

$$dQ/d\theta = k A dt/dx$$

$dQ/d\theta$ = laju perpindahan panas

A = luas area; k = konduktivitas termal

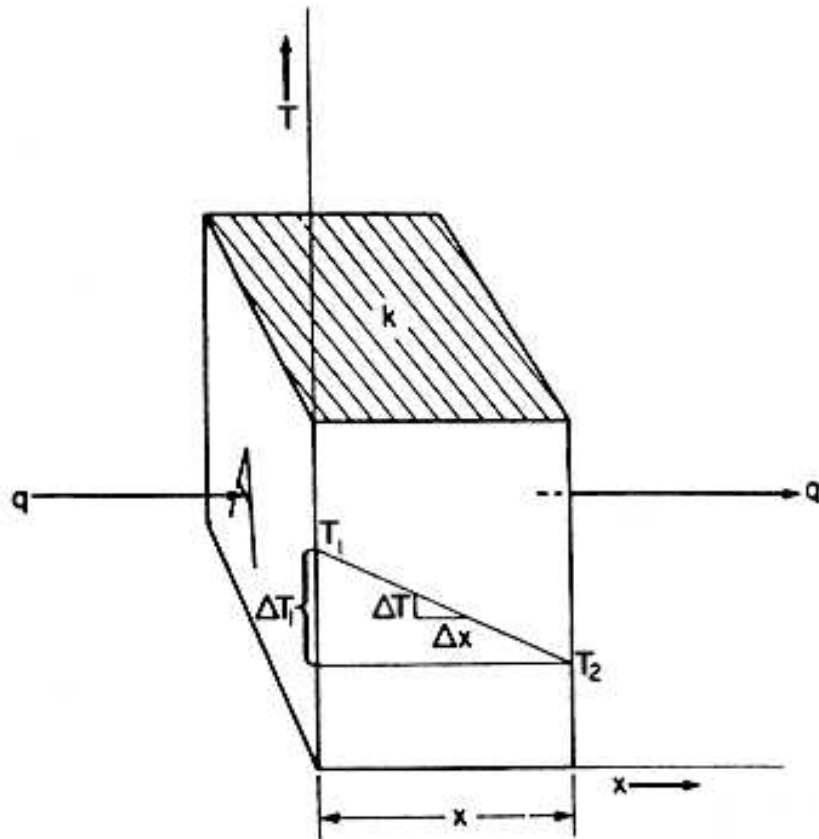
dt/dx = perubahan suhu tiap satuan panjang (jarak)

$$k = dQ/d\theta * 1/A * 1/(dt/dx)$$

$$= \text{Js}^{-1} * \text{m}^{-2} * 1/(\text{°C m}^{-1})$$

$$= \text{Jm}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$$

slab



- Pada proses *steady state*, $dQ/d\theta$ tetap

$$q = k A dt/dx$$

$$q = k A (t_1 - t_2)/x$$

$$q = k A \Delta t/x = (k/x) A \Delta t$$

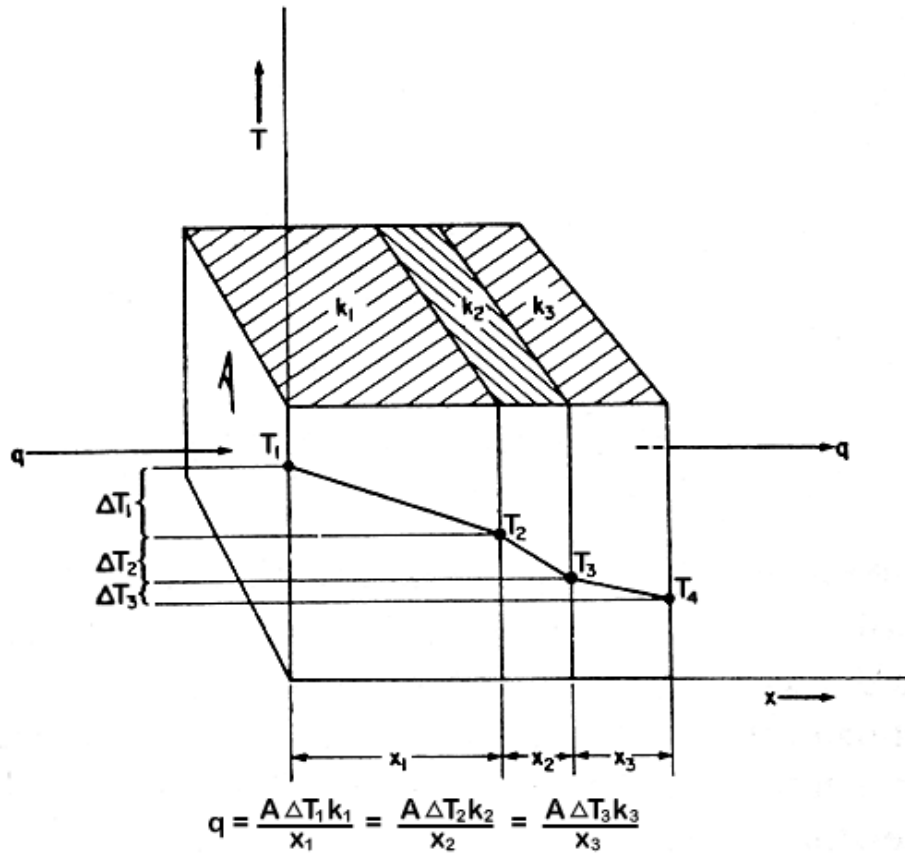
$k/x = C = \text{heat}$
 conductance

- Satuan : $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Soal 1

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

seri



Pada proses *steady state*, panas per satuan waktu dalam jumlah yang sama menembus tiap lapisan

$$q = (k/x) A \Delta t$$

$$A \sum \Delta t_i = q \sum (x_i/k_i)$$

$$A (\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3) = q (1/U)$$

$$q = U A \Delta t$$

U = overall conductance for the combined layers

Soal 2

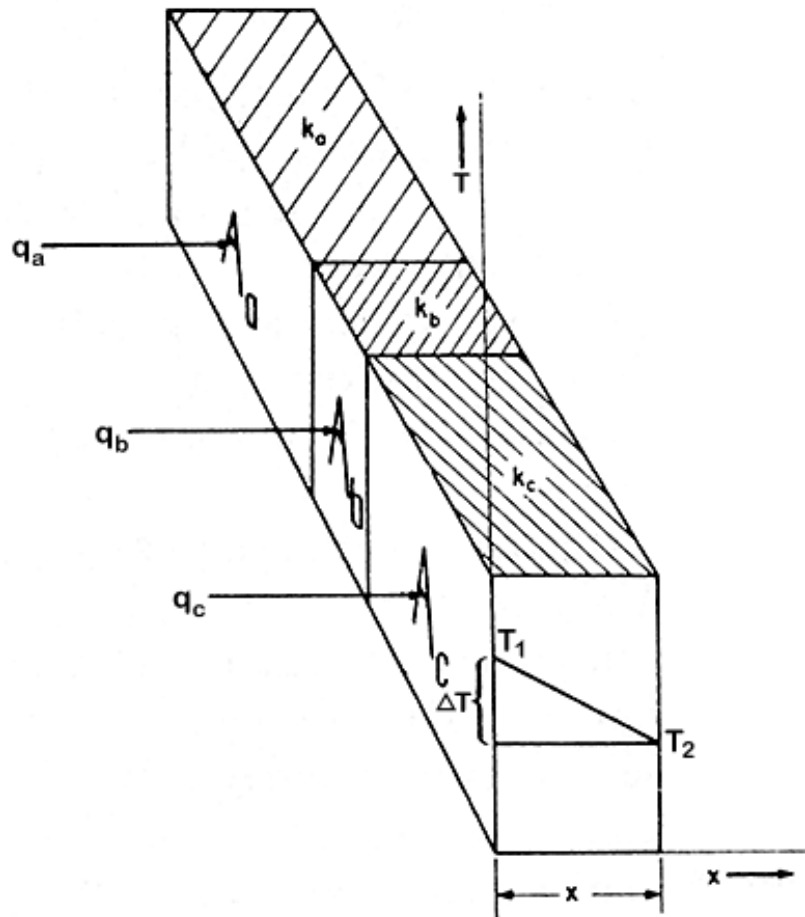
- Dinding suatu *cold store* tersusun atas 11 cm bata (luar), 7,5 cm beton & 10 cm gabus (dalam). Suhu dinding terluar 18°C & dalam ruang -18°C .

Hitung laju perpindahan panas melalui dinding.

Tentukan juga suhu antara beton & gabus.

(k bata 0,69; beton 0,76; gabus 0,043 J/m.s. $^{\circ}\text{C}$)

paralel



$$q_a = (k_a/x) A_a \Delta t$$

$$q_b = (k_b/x) A_b \Delta t$$

$$q_c = (k_c/x) A_c \Delta t$$

$$q_a = \frac{A_a \Delta T k_a}{x} \quad q_b = \frac{A_b \Delta T k_b}{x} \quad q_c = \frac{A_c \Delta T k_c}{x}$$

Soal 3

- Dinding oven dibuat dari bata insulasi setebal 10 cm dengan konduktivitas termal $0,22 \text{ J m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Antar dinding bata diperkuat dengan baja sebesar 1% dari total luas area melintang dinding. Konduktivitas termal baja $45 \text{ J m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Hitung
 - (a) Proporsi relatif panas total yang dipindahkan melalui bata dan baja
 - (b) *Heat loss* per m^2 dinding oven jika suhu di bagian dalam 230°C & di bagian luar 25°C .

Pindah Panas Permukaan

$$q = h_s A (t_a - t_s)$$
$$h_s = k / x$$

- h_s = koefisien transfer panas permukaan
- t_a = suhu fluida pemanas atau pendingin
- t_s = suhu permukaan padat
- k = konduktivitas panas
- x = ketebalan

$$1/U = (1/h_{s1} + x_1/k_1 + x_2/k_2 + 1/h_{s2})$$
$$q = U A \Delta t$$

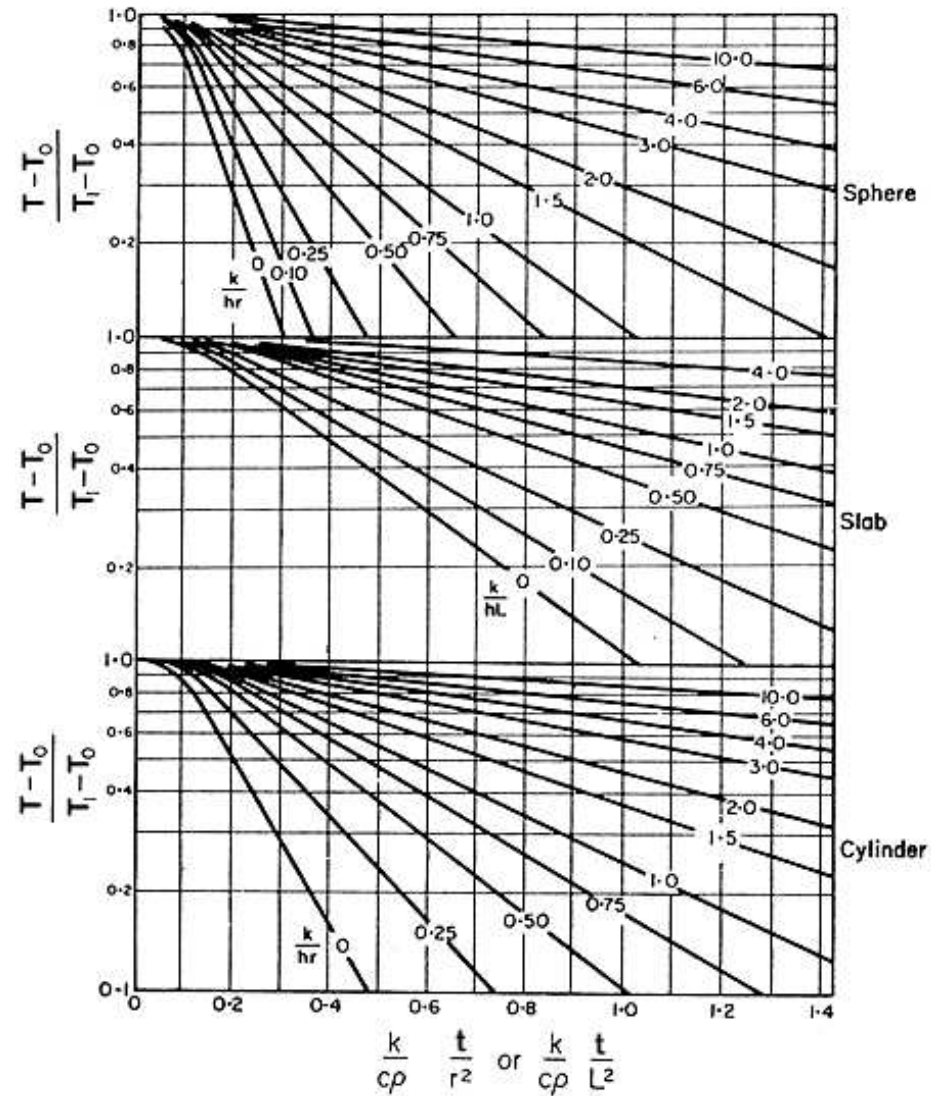
APPROXIMATE RANGE OF SURFACE HEAT TRANSFER COEFFICIENTS

	h ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$)
Boiling liquids	2400-24,000
Condensing liquids	1800-18,000
Still air	6
Moving air (3 m s^{-1})	30
Liquids flowing through pipes	1200-6000

Soal 4

- Larutan gula dipanaskan dalam tangki stainless steel dengan jaket pemanas setebal 1,6 mm. Koefisien transfer permukaan untuk steam 12000 J/m²s°C dan untuk larutan gula 3000 J/m²s°C. Konduktivitas termal bahan tangki 21 J / ms°C. Steam yang digunakan bersuhu 134°C dengan panas laten 2164 kJ/kg (*ekuivalen dg tekanan 200 kPa gauge*). Suhu larutan gula 83°C.
- Berapa jumlah steam yang dibutuhkan per detik bila luas permukaan transfer 1,4 m²?

- Pelajari juga Pindah Panas pada *Unsteady State* (Earle chapter 5)



KONVEKSI

- pergerakan molekul-molekul dalam fluida (cair & gas)
- Laju perpindahan panas

$$q = h_c A \Delta t$$

h_c = koefisien perpindahan panas ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

A = luas permukaan kontak fluid-solid

- Bilangan Nusselt $(Nu) = (h_c D) / k$
- Bilangan Prandtl $(Pr) = (c_p \mu) / k$
- Bilangan Grashof $(Gr) = (D^3 \rho^2 g \beta \Delta t) / \mu^2$
- Bilangan Reynold $(Re) = (D v \rho) / \mu$

- h_c = koefisien perpindahan panas
- c_p = panas spesifik; v = laju alir
- ρ = densitas; μ = viskositas; D = diameter
- β = koefisien ekspansi panas ($1/T$ untuk gas)
- g = percepatan gravitasi
- k = konduktivitas termal

Konveksi Alami

- terjadi saat fluida mengalami kontak dengan permukaan yang lebih panas atau lebih dingin.
- Fluida tersebut mengalami perubahan densitas yang mengakibatkan pergerakan fluida sehingga perpindahan panas terus berlangsung.
- Contoh : makanan yang disimpan dalam pendingin dengan sirkulasi udara tanpa fan
- Secara umum,

$$(\text{Nu}) = A (\text{Pr})^a (\text{Gr})^b (L/D)^c$$

(nilai A , a , b , c berbeda pada kondisi yg berbeda)

- Silinder dan lempeng tegak

$$10^4 < (Pr \cdot Gr) < 10^9$$

$$(Nu) = 0,53 (Pr \cdot Gr)^{0,25}$$

$$h_c = 1,3 (\Delta t / L)^{0,25}$$

$$10^9 < (Pr \cdot Gr) < 10^{12}$$

$$(Nu) = 0,12 (Pr \cdot Gr)^{0,33}$$

$$h_c = 1,8 (\Delta t)^{0,25}$$

- Silinder horizontal

$$10^3 < (Pr \cdot Gr) < 10^9$$

$$(Nu) = 0,54 (Pr \cdot Gr)^{0,25}$$

$$h_c = 1,3 (\Delta t / D)^{0,25}$$

Konveksi Paksa (*Forced Conv.*)

- Adanya hal-hal eksternal yang menyebabkan pergerakan fluida
- Laju perpindahan panas lebih besar dibandingkan konveksi alami
- Semakin tinggi kecepatan fluida, semakin tinggi pula laju perpindahan panas

- Secara umum :

$$\mathbf{Nu = A (Re)^a (Pr)^b}$$

(nilai A , a , b berbeda pada kondisi yg berbeda)

Pemanasan/pendinginan dalam tabung;
umumnya bahan pangan berbentuk fluida
dipompa melalui pipa

- $(Re) < 2100$
→ $(Nu) = 4$
- $(Re) > 2100$; $(Pr) > 0,5$
→ $(Nu) = 0,023 (Re)^{0,8} (Pr)^{0,4}$
- $(Re) > 10000$
→ $(Nu) = 0,027 (\mu/\mu_s)^{0,14} (Re)^{0,8} (Pr)^{0,33}$
- Untuk gas
→ $(Nu) = 0,02 (Re)^{0,8}$
- μ_s = viskositas fluida pada permukaan tabung

Pemanasan/pendinginan pada permukaan datar

- $(Re) > 20000$
→ $(Nu) = 0,036 (Re)^{0,8} (Pr)^{0,33}$

Untuk aliran udara melalui permukaan datar

- $v < 5 \text{ m/s}$
→ $h_c = 5,7 + 3,9 v$
- $5 < v < 30 \text{ m/s}$
→ $h_c = 7,4 v^{0,8}$

Pemanasan/pendinginan di luar tabung

- $1 < (Re) < 200$
→ $(Nu) = 0,86 (Re)^{0,43} (Pr)^{0,3}$
- $(Re) > 200$
→ $(Nu) = 0,26 (Re)^{0,6} (Pr)^{0,3}$

Soal 5

- Air bersuhu 24°C mengalir dengan kecepatan $0,3 \text{ m/s}$ melewati sosis diameter $7,5 \text{ cm}$, suhu 74°C . (\Rightarrow *pendinginan paksa di luar tabung*)
Hitung koefisien perpindahan panas konveksi.
Diketahui c_p air pada $49^{\circ}\text{C} = 4,186 \text{ kJ/kg}$

Soal 6

Puree sayuran mengalir dengan kecepatan 3 m / menit pada sebuah plat dengan panjang 0,9 m & lebar 0,6 m. Pemanasan dilakukan dengan steam di satu sisi plat dan permukaan plat yang kontak dengan puree bersuhu 104°C.

Hitung koefisien perpindahan panas permukaan, dengan asumsi puree tersebut memiliki densitas 1040 kg/m³, panas spesifik 3980 J/(kg.°C), viskositas 0,002 N s m⁻² dan konduktivitas termal 0,52 J/m s °C.

Soal 7

- Sebuah tangki pemasak berbentuk silinder vertikal dengan diameter 0,9 m & tinggi 1,2 m. Bagian luar dari tangki bersuhu 49°C dan suhu udara 17°C . Aliran udara bergerak dengan kecepatan 61 m per menit.

Hitung laju kehilangan panas dari tangki masak tersebut.

Asumsikan tangki ekuivalen dengan permukaan datar

RADIASI

- oleh gelombang elektromagnetik

$$q = \varepsilon A \sigma T^4 \text{ (Stefan-Boltzmann Law)}$$

ε (epsilon) = emisivitas (nilai 0 s.d.1)

σ (sigma) = konstanta Stefan-Boltzmann
= $5,73 * 10^{-8} \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-4}\text{s}^{-1}$

A = luas permukaan

T = suhu absolut

- Radiasi antara 2 objek

$$q = A C \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

$$1/C = 1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1$$

- Radiasi dari lingkungan terhadap suatu objek

$$q = \varepsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

- Jika $(T_1 - T_2) \ll T_1$ or T_2

$$q = 0.23\varepsilon (T_m / 100)^3 A \Delta T$$

Soal 8

- Hitung pindah panas radiasi ke dalam roti dari oven dengan suhu seragam 177°C , jika emisivitas permukaan roti 0,85. Luas area total dan suhu roti berturut-turut $0,0645 \text{ m}^2$ dan 100°C .

