

# Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas yang terjadi jika cairan atau gas yang suhunya tinggi mengalir ke tempat yang suhunya lebih rendah, memberikan panasnya pada permukaan yang suhunya lebih rendah.

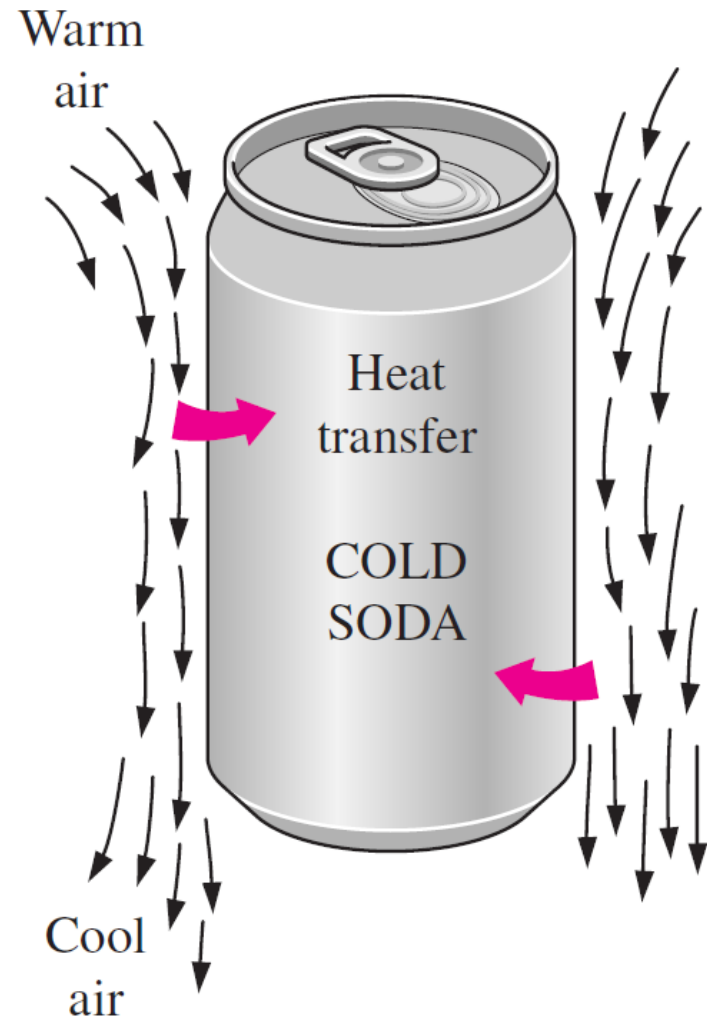
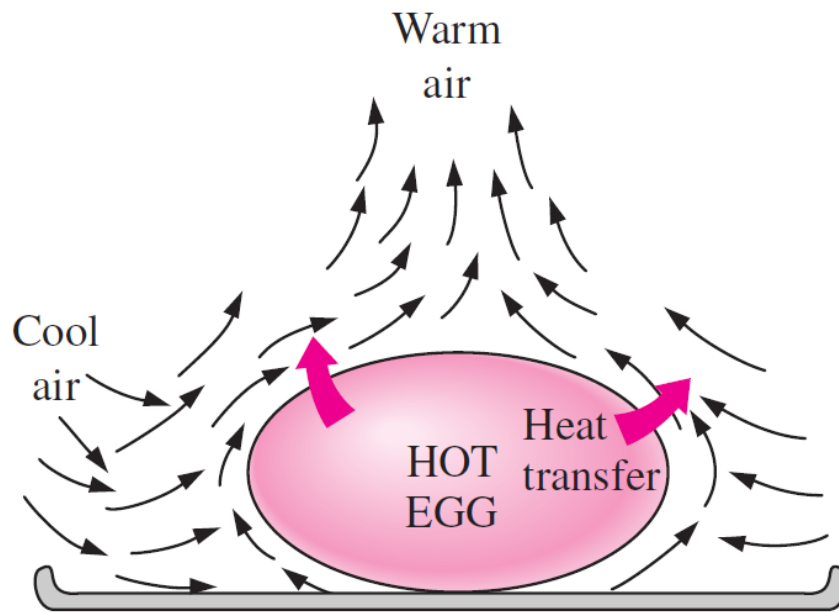
Hukum Newton untuk konveksi:

$$Q = h.A.(T_w - T_{\infty})$$

dengan  $(T_w > T_{\infty})$

## FIGURE 9-1

The cooling of a boiled egg in a cool environment by natural convection.



## FIGURE 9-2

The warming up of a cold drink in a warmer environment by natural convection.

# Perpindahan Panas Konveksi Bebas (*free convection*)

Disebut juga konveksi alamiah (*natural convection*), terjadi karena fluida mengalir secara alamiah/tidak dipompa/tidak dihembus. Fluida dapat mengalir secara alamiah karena adanya perubahan sifat fisis (terutama rapat massanya) dan pengaruh dari gaya apung (*bouyancy force*).

Hukum Newton untuk konveksi:

$$Q = h.A.(T_w - T_\infty)$$

dengan  $(T_w > T_\infty)$

# Koefisien Perpindahan Panas Konveksi (h) pada Konveksi Bebas

$$Q = h \cdot A \cdot (T_w - T_\infty)$$

- ❏ Aliran fluida pada perpindahan panas konveksi bebas terjadi secara alami karena gaya apung, sehingga hampir selalu berada pada kecepatan rendah ( $\leq 1$  m/s)
- ❏ Secara umum, koefisien perpindahan panas konveksi bebas bernilai lebih kecil dibandingkan koefisien perpindahan panas konveksi paksaan.
- ❏ Nilai  $h$  pada perpindahan panas konveksi bebas dipengaruhi oleh sifat fisis fluida dan bentuk geometri benda.

- ❏ Penyelesaian umum pada persamaan perpindahan panas konveksi memunculkan suatu parameter berupa bilangan tak berdimensi yang disebut dengan bilangan Grashof ( Gr)

$$Gr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

dengan

- ❏  $g$  : percepatan gravitasi,  $m/s^2$

- ❏  $\beta$  : koefisien ekspansi volum ( $1/T_f$ ),  $1/K$

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

- ❏  $\nu$  : viskositas kinematik fluida,  $m^2/s$

- ❏  $T_w$  : Suhu permukaan benda, K

- ❏  $T_\infty$  : Suhu fluida pada jarak tak hingga dari benda, K

- ❏  $L$  : Panjang karakteristik, m

- ❏ Selain bilangan Grashof ( Gr), koefisien perpindahan panas pada konveksi bebas juga dipengaruhi oleh bilangan Prandtl

$$\text{Pr} = \frac{\text{molecular diffusivity of momentum}}{\text{molecular diffusivity of heat}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu.C_p}{k}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \text{viskositas kinematis}$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho.C_p} = \text{difusivitas termal}$$

- ❏ Catatan: sifat fisis fluida dievaluasi pada suhu lapisan film ( $T_f$ ) dengan

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

Koefisien perpindahan panas konveksi bebas rata-rata untuk berbagai situasi dapat didekati dengan persamaan empiris sebagai berikut:

$$Nu = \frac{hL}{k} = C(GrPr)^n = CRa^n$$

dengan

k : konduktivitas termal fluida

L : panjang karakteristik

Ra : bilangan Rayleigh = GrPr

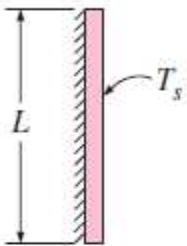
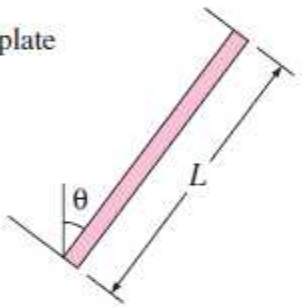
Nilai C dan n tergantung pada geometri benda dan daerah aliran yang dikarakterisasikan dalam bilangan Rayleigh.

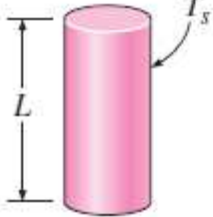
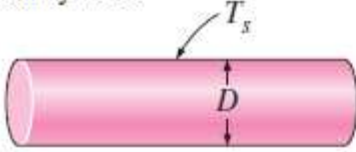
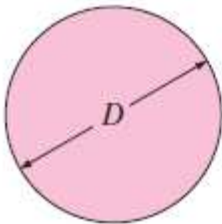
Beberapa persamaan empiris untuk kasus-kasus perpindahan panas konveksi bebas pada berbagai geometri benda terangkum dalam tabel 9-1 (Cengel, 2003). Bentuk geometri yang ditinjau meliputi:

- 1. Plat tegak (vertical plate)**
- 2. Plat datar (horizontal plate)**
- 3. Plat yang dimiringkan (inclined plate)**
- 4. Silinder**
- 5. Bola**

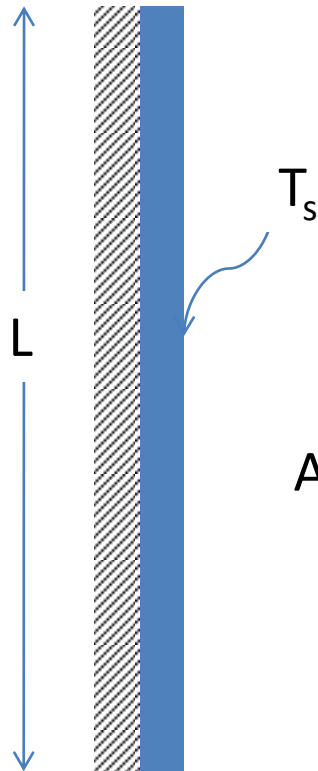
TABLE 9-1

### Empirical correlations for the average Nusselt number for natural convection over surfaces

| Geometry                                                                                                                                                                                                                   | Characteristic length $L_c$ | Range of Ra                                           | Nu                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vertical plate<br>                                                                                                                        | $L$                         | $10^4$ – $10^9$<br>$10^9$ – $10^{13}$<br>Entire range | $Nu = 0.59Ra_L^{1/4}$ (9-19)<br>$Nu = 0.1Ra_L^{1/3}$ (9-20)<br>$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$ (9-21)<br>(complex but more accurate) |
| Inclined plate<br>                                                                                                                        | $L$                         |                                                       | Use vertical plate equations for the upper surface of a cold plate and the lower surface of a hot plate<br><br>Replace $g$ by $g \cos\theta$ for $Ra < 10^9$                                  |
| Horizontal plate<br>(Surface area $A$ and perimeter $p$ )<br>(a) Upper surface of a hot plate<br>(or lower surface of a cold plate)<br> | $A_s/p$                     | $10^4$ – $10^7$<br>$10^7$ – $10^{11}$                 | $Nu = 0.54Ra_L^{1/4}$ (9-22)<br>$Nu = 0.15Ra_L^{1/3}$ (9-23)                                                                                                                                  |
| (b) Lower surface of a hot plate<br>(or upper surface of a cold plate)<br>                                                               |                             | $10^5$ – $10^{11}$                                    | $Nu = 0.27Ra_L^{1/4}$ (9-24)                                                                                                                                                                  |

|                                                                                                              |     |                                        |                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Vertical cylinder</p>    | $L$ |                                        | <p>A vertical cylinder can be treated as a vertical plate when</p> $D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}}$  |
| <p>Horizontal cylinder</p>  | $D$ | $Ra_D \leq 10^{12}$                    | $Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (9-25)$ |
| <p>Sphere</p>               | $D$ | $Ra_D \leq 10^{11}$<br>$(Pr \geq 0.7)$ | $Nu = 2 + \frac{0.589Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.469/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (9-26)$                       |

# 1. Plat tegak (vertical plate)



Panjang karakteristik : L

Kisaran Ra

Nu

$$10^4 - 10^9$$

$$Nu = 0,59Ra_L^{1/4}$$

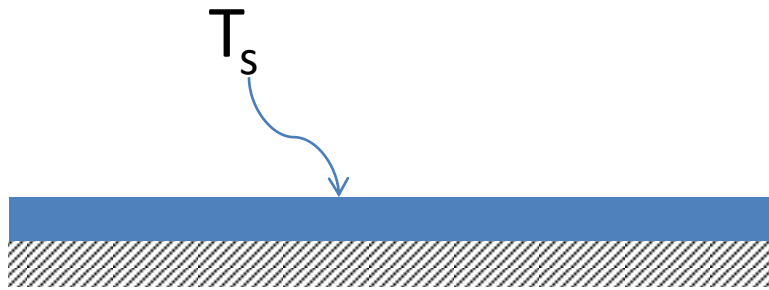
$$10^9 - 10^{13}$$

$$Nu = 0,1Ra_L^{1/3}$$

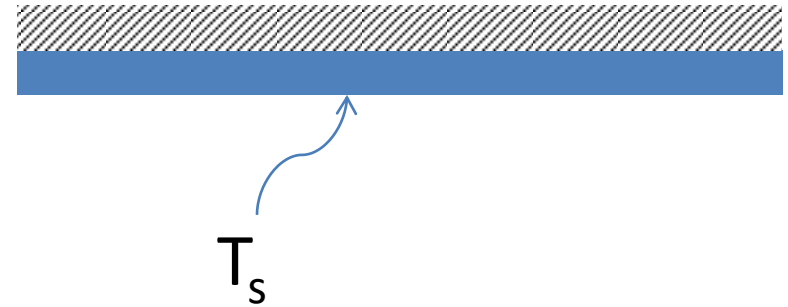
Atau dapat juga digunakan Nu untuk seluruh kisaran

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra_L^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

## 2. Plat datar (horizontal plate)



**a)**



**b)**

Kisaran Ra

Nu

$10^4 - 10^7$

$$Nu = 0,54Ra_L^{1/4}$$

$10^7 - 10^{11}$

$$Nu = 0,15Ra_L^{1/3}$$

Kisaran Ra

Nu

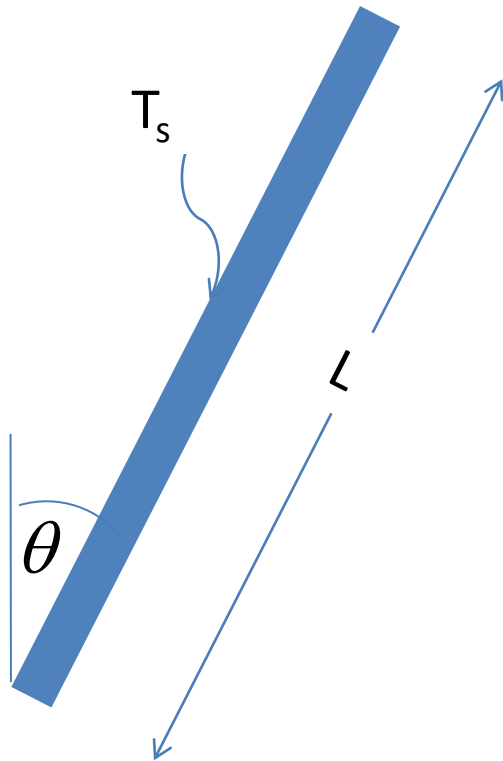
$10^5 - 10^{11}$

$$Nu = 0,27Ra_L^{1/4}$$

Panjang karakteristik untuk kedua kasus :  $A_s/p$

(dengan  $A_s$  adalah luas plat dan  $p$  adalah keliling plat)

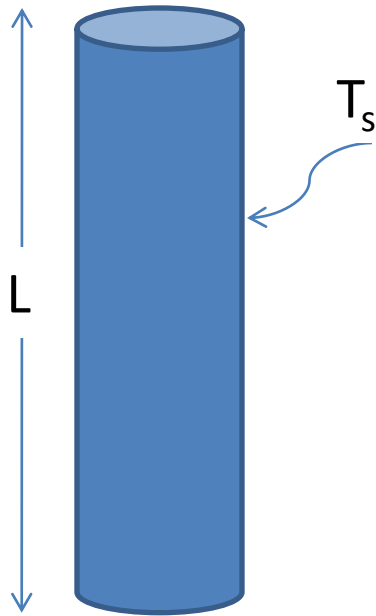
### 3. Plat yang dimiringkan (inclined plate)



Panjang karakteristik :  $L$

Untuk kasus ini persamaan yang digunakan sama dengan kasus 2b dengan modifikasi yaitu  $g$  (pada bilangan Grashof) diganti dengan  $g \cos \theta$  untuk kisaran  $Ra < 10^9$

## 4. Silinder tegak (vertical cylinder)

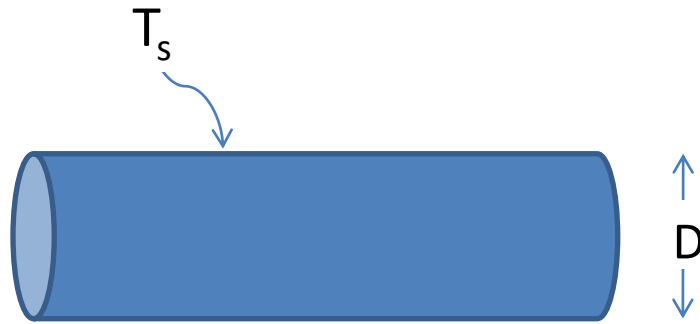


Panjang karakteristik : L

Silinder tegak dapat disamakan dengan plat tegak ketika

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}}$$

## 5. Silinder horisontal (horizontal cylinder)

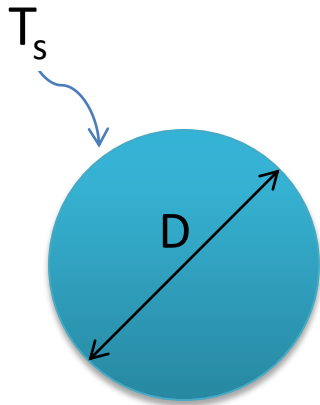


Panjang karakteristik :  $D$

Untuk  $Ra \leq 10^{12}$

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

## 6. Bola



Panjang karakteristik : D

Untuk  $Ra \leq 10^{11}$

$Pr \geq 0,7$

$$Nu = 2 + \frac{0,589 Ra_D^{1/4}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,469}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{4/9}}$$

## Contoh soal:

Karena terdapat perbedaan antara suhu tubuh normal dengan suhu lingkungan, maka secara alami manusia akan kehilangan panas ke lingkungan sekitar setiap saat. Jika suhu lingkungan rata-rata adalah 29 C, suhu normal tubuh manusia adalah 37 C, dan panas yang hilang ke lingkungan dianggap mengikuti mekanisme perpindahan panas konveksi bebas, hitung berapa panas yang hilang setiap saat!

## Analisis:

### Asumsi yang digunakan:

1. Panas yang hilang hanya disebabkan oleh beda suhu antara tubuh dengan lingkungan.
2. Tidak ada gaya luar yang menyebabkan aliran udara sehingga perpindahan panas mengikuti mekanisme konveksi bebas.
3. Tubuh manusia adalah silinder tegak dengan diameter 30 cm dan tinggi 160 cm.
4. Perpindahan panas terjadi pada steady-state
5. Udara dianggap sebagai gas ideal
6. Tekanan udara 1 atm

Sifat-sifat fisis udara:

Sifat-sifat fisis udara ditentukan berdasarkan suhu film ( $T_f$ )

$T_w$  = Suhu rata-rata tubuh manusia = 37 C = 310 K

$T_\infty$  = Suhu lingkungan = 29 C = 302 K

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2} = \frac{(310 + 302)K}{2} = 306 K$$

Berikut adalah data sifat fisis udara pada suhu 33 C dan tekanan 1 atm

$k = 0,026 \text{ W/m}^\circ\text{K}$

$\rho = 1,148 \text{ kg/cum}$

$\mu = 1,874 \times 10^{-5} \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$

$C_p = 1012 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$

- Viskositas kinematis :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{(1,874 \times 10^{-5}) \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}}{1,148 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1,632 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

- Panjang karakteristik = L = tinggi tubuh manusia = 160 cm = 1,6 m
- Koefisien ekspansi volum

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{306 \text{ K}} = 3,27 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$$

- Percepatan gravitasi, g = 9,8 m/s<sup>2</sup>

- Bilangan Grashof (Gr)

$$\begin{aligned} \text{Gr}_L &= \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\nu^2} \\ &= \frac{\left(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \left(3,27 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}\right) ((310 - 302) \text{K}) ((1,6)^3 \text{m}^3)}{\left(1,632 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)^2} \\ &= 3.942.606.690 = 3,943 \times 10^9 \end{aligned}$$

- Bilangan Prandtl(Pr)

$$Pr = \frac{\mu.C_p}{k} = \frac{\left(1,874 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}\right) \left(1012 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}\right)}{0,026 \frac{\text{W}}{\text{m.K}}} = 0,7294$$

- Bilangan Rayleigh (Ra)

$$Ra = Gr.Pr = (3,943 \times 10^9)(0,7294) = 2,858 \times 10^9$$

- Silinder tegak dapat disamakan dengan plat tegak jika

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}}$$

$$\frac{35L}{Gr_L^{1/4}} = \frac{35(1,6 \text{ m})}{(3,943 \times 10^9)^{1/4}} = 0,22 \text{ m}$$

diketahui diameter silinder = 30 cm = 0,3 m (> 0,22 m) ,  
sehingga untuk kasus ini persamaan Nu yang digunakan  
sama dengan persamaan untuk plat tegak pada kisaran :

$$Ra \ 10^9 - 10^{13}$$

$$Nu = 0,1Ra_L^{1/3} = 0,1(2,858 \times 10^9)^{1/3} = 141,91$$

■ Koefisien perpindahan panas konveksi bebas

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad \Rightarrow \quad h = \frac{kNu}{L}$$

$$= \frac{\left(0,026 \frac{W}{mK}\right) 141,91}{1,6m} = 2,306 \frac{W}{m^2K}$$

- Luas permukaan silinder

$$\begin{aligned} A &= (\pi D L) + \left( \frac{\pi}{4} D^2 \right) \\ &= (\pi \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 1,6 \text{ m}) + \left( \frac{\pi}{4} (0,3 \text{ m})^2 \right) \\ &= 1,65 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Panas hilang

$$\begin{aligned} Q &= h \cdot A \cdot (T_w - T_\infty) \\ &= 2,306 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \cdot 1,65 \text{ m}^2 \cdot (310 - 302) \text{ K} \\ &= 30,44 \text{ W} = 30,44 \frac{\text{J}}{\text{s}} \end{aligned}$$

- Panas yang hilang selama 1 hari

$$\begin{aligned} Q &= 30,44 \frac{\text{J}}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1\text{jam}} \times \frac{24 \text{ jam}}{1\text{hari}} \\ &= 2630016 \text{ J/hari} \\ &= 2630,016 \text{ kJ/hari} \\ &= 631,204 \text{ kcal/hari} \end{aligned}$$

Tambahan:

Energi manusia secara alami akan berkurang akibat beda suhu antara tubuh dengan lingkungan. Jadi minimal energi yang dibutuhkan oleh manusia dalam sehari adalah sejumlah panas yang hilang yaitu sebesar 631,204 kcal.