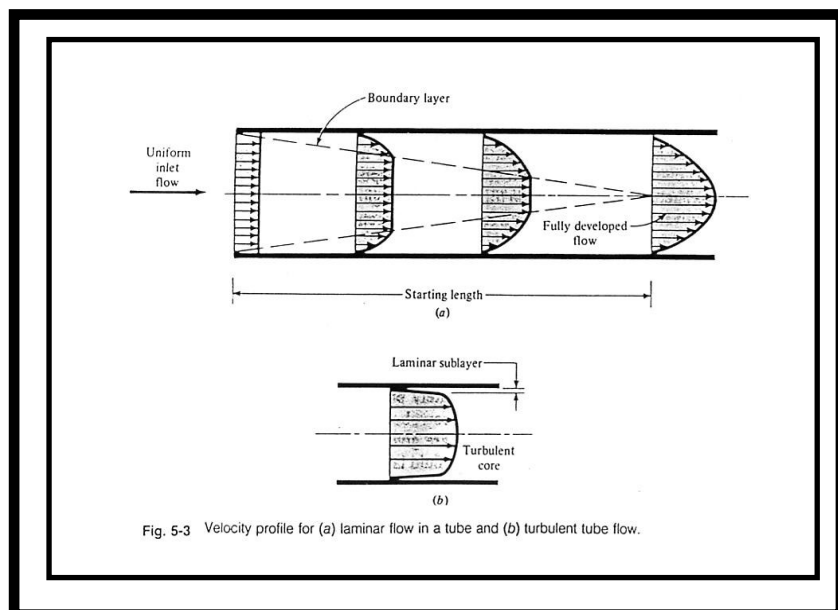


DIKTAT KULIAH
PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA



JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DARMA PERSADA

2009

DIKTAT KULIAH

PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA

Disusun :

ASYARI DARAMI YUNUS

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik
Universitas Darma Persada
Jakarta.

KATA PENGANTAR

Untuk memenuhi buku pegangan dalam perkuliahan, terutama yang menggunakan bahasa Indonesia dalam bidang teknik, maka kali ini penulis menyempatkan diri untuk ikut membuat sebuah buku/diktat yang bisa digunakan oleh mahasiswa teknik, terutama mahasiswa jurusan teknik mesin. Kali ini penulis menyiapkan diktat yang ditujukan untuk mata kuliah Perpindahan Panas dan Massa.

Dalam penyusunan buku ini penulis berusaha menyesuaikan materinya dengan kurikulum di jurusan Teknik Mesin, Universitas Darma Persada Indonesia.

Perlu ditekankan bahwa buku ini belum merupakan referensi lengkap dari pelajaran Perpindahan Panas dan Massa, sehingga mahasiswa perlu untuk membaca buku-buku referensi lain untuk melengkapi pengetahuannya tentang materi buku ini.

Akhir kata, mudah-mudahan buku ini bisa menjadi penuntun bagi mahasiswa dan memberikan manfaat sebagaimana yang diharapkan. Tak lupa penulis mengucapkan banyak-banyak terima-kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dalam penyelesaian pembuatan buku ini.

Jakarta, 21 Oktober 2009

IR. ASYARI D. YUNUS SE. MSc.

DAFTAR ISI

- BAB 1. Pendahuluan. 1
- BAB 2. Konduksi Aliran Stedi - Satu Dimensi. 13
- BAB 3. Konduksi Aliran Stedi - Dimensi Banyak. 61
- BAB 4. Prinsip-prinsip Konveksi. 72
- BAB 5. Radiasi.
- BAB 6. Penukar Kalor.
- BAB 7. Perpindahan Massa.

BAB I

PENDAHULUAN

Tiga model perpindahan kalor:

1. konduksi
2. konveksi
3. radiasi.

Perpindahan Kalor Konduksi

Jika ada perbedaan temperatur pada suatu benda, maka akan ada perpindahan energi dari suhu tinggi ke suhu rendah, perpindahan energi ini disebut **konduksi**. Laju perpindahan kalor konduksi:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.1)$$

Dimana: q = laju perpindahan kalor, watt

$\partial T/\partial x$ = gradien suhu pada arah aliran kalor

k = konduktivitas termal bahan, watt/m.°C

Tanda negatif pada persamaan diatas diberikan supaya memenuhi hukum termodinamika yaitu kalor mesti mengalir ke suhu yang lebih rendah seperti ditunjukkan gambar 1.

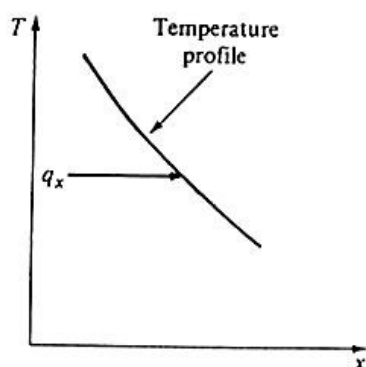


Fig. 1-1 Sketch showing direction of heat flow.

Gambar 1. Sketsa yang menunjukkan arah aliran kalor.

Perhatikan gambar 2, jika sistem berada dalam kondisi stedi (tunak) yaitu temperatur tidak berubah terhadap waktu, kita hanya perlu mengintegrasikan

persamaan (1.1). Jika terjadi perubahan suhu terhadap waktu maka penyelesaian persamaan diatas akan lebih kompleks.

Untuk elemen dengan ketebalan dx , keseimbangan energinya adalah:

Energi konduksi masuk dari kiri + kalor yang dibangkitkan dari elemen =
Perubahan energi dalam + energi konduksi keluar di sebelah kanan.

Energi masuk pada sisi kiri : $q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$

Energi yang dibangkitkan elemen = $qA dx$

Perubahan energi dalam = $\rho c A \frac{\partial T}{\partial \tau} dx$

Energi keluar sisi kanan = $q_{x+dx} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \Big]_{x+dx}$
 $= -A \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right]$

dimana: q = energi yang dihasilkan per satuan volume, W/m^3

c = kalor spesifik bahan

ρ = kerapatan, kg/m^3

τ = waktu

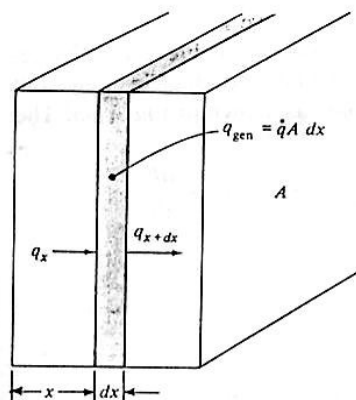


Fig. 1-2 Elemental volume for one-dimensional heat-conduction analysis.

Gambar 2. Volume satuan untuk analisis konduksi kalor satu dimensi.

Dengan menggabungkan persamaan-persamaan diatas diperoleh:

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q} A dx = \rho A dx \frac{\partial T}{\partial \tau} - A \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right]$$

atau:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1.2)$$

Ini merupakan persamaan konduksi kalor satu dimensi. Untuk kondisi lebih dari satu dimensi, keseimbangan energi adalah:

$$q_x + q_y + q_z + q_{gen} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + dE/d\tau$$

Dan jumlah energi diberikan oleh:

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_{x+dx} = - \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy dz$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_{y+dy} = - \left[k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy \right] dx dz$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$q_{z+dz} = - \left[k \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz \right] dx dy$$

$$q_{gen} = \dot{q} dx dy dz$$

$$\frac{dE}{d\tau} = \rho c dx dy dz \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

Sehingga secara umum persamaan kalor konduksi tiga dimensi adalah:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1-3)$$

Untuk konduktivitas termal konstan, persamaan (1.3) bisa ditulis

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1-3a)$$

Dimana: $\alpha = k/\rho c$ disebut difusitas termal bahan. Makin besar harga α makin cepat kalor berdifusi ke bahan. Difusivitas termal mempunyai satuan meter kwadrat per detik.

Persamaan 1-3a bisa dirobah ke dalam koordinat silinder atau bola menjadi:

Koordinat silinder:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1-3b)$$

Koordinat bola:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rT) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1-3c)$$

Kondisi-kondisi khusus:

- Aliran kalor satu dimensi kondisi stedi (tanpa pembangkitan panas):

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$

- Aliran kalor pada koordinat silinder satu dimensi kondisi stedi (tanpa pembangkitan panas):

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0$$

- Aliran kalor satu dimensi kondisi stedi dengan pembangkitan kalor:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{q}{k} = 0$$

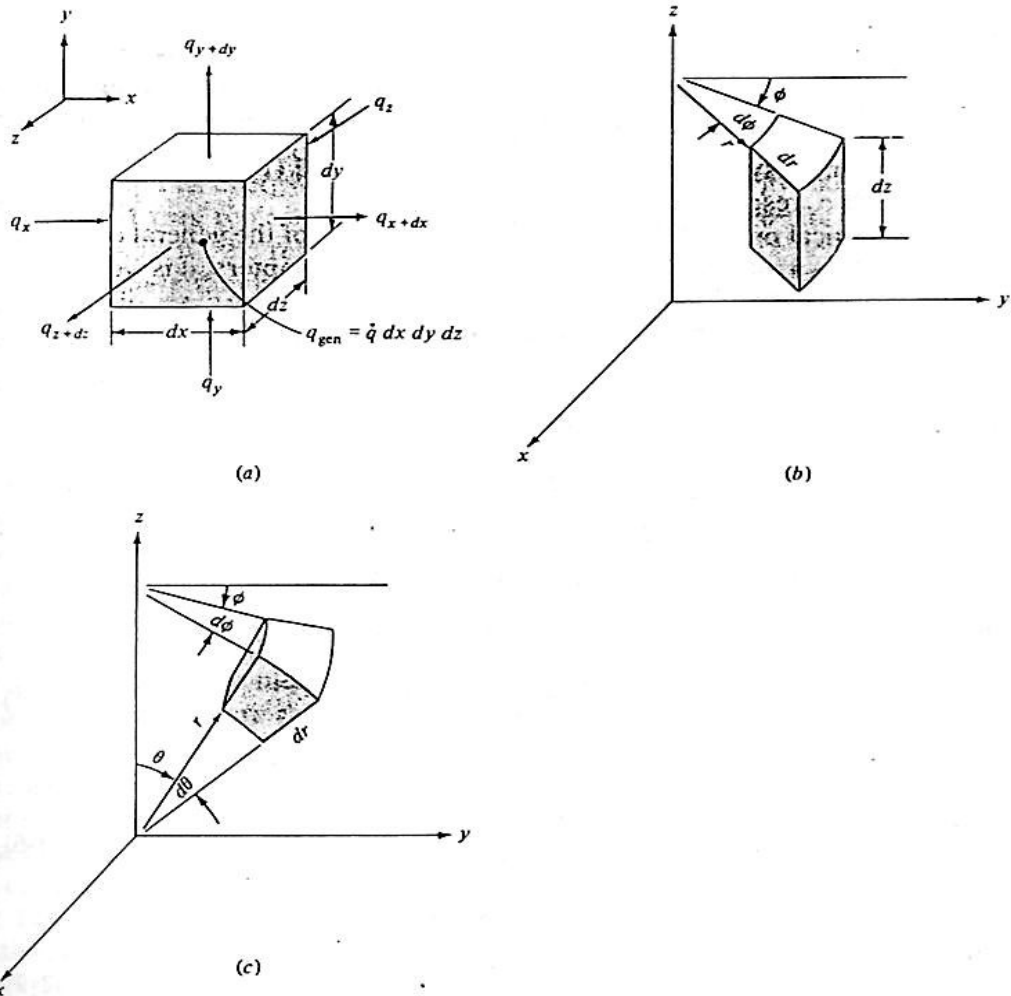


Fig. 1-3 Elemental volume for three-dimensional heat-conduction analysis: (a) cartesian coordinates; (b) cylindrical coordinates; (c) spherical coordinates.

- Konduksi kondisi stedi dua dimensi dengan pembangkitan kalor:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0$$

Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal ditentukan dari eksperimen. Harga-harga konduktivitas untuk beberapa material ditunjukkan pada tabel 1. Umumnya, konduktivitas termal sangat dipengaruhi oleh suhu.

Table 1-1 Thermal Conductivity of Various Materials at 0°C

<i>Material</i>	<i>Thermal conductivity</i> <i>k</i>	
	W/m · °C	Btu/h · ft · °F
Metals:		
Silver (pure)	410	237
Copper (pure)	385	223
Aluminum (pure)	202	117
Nickel (pure)	93	54
Iron (pure)	73	42
Carbon steel, 1% C	43	25
Lead (pure)	35	20.3
Chrome-nickel steel (18% Cr, 8% Ni)	16.3	9.4
Nonmetallic solids:		
Quartz, parallel to axis	41.6	24
Magnesite	4.15	2.4
Marble	2.08–2.94	1.2–1.7
Sandstone	1.83	1.06
Glass, window	0.78	0.45
Maple or oak	0.17	0.096
Sawdust	0.059	0.034
Glass wool	0.038	0.022
Liquids:		
Mercury	8.21	4.74
Water	0.556	0.327
Ammonia	0.540	0.312
Lubricating oil, SAE 50	0.147	0.085
Freon 12, CCl ₂ F ₂	0.073	0.042
Gases:		
Hydrogen	0.175	0.101
Helium	0.141	0.081
Air	0.024	0.0139
Water vapor (saturated)	0.0206	0.0119
Carbon dioxide	0.0146	0.00844

Konduktivitas termal untuk gas-gas yang umum ditunjukkan oleh gambar 4, sedangkan gambar 5 menunjukkan konduktivitas termal untuk zat cair yang umum. Gambar 6 adalah konduktivitas beberapa bahan padat yang umum.

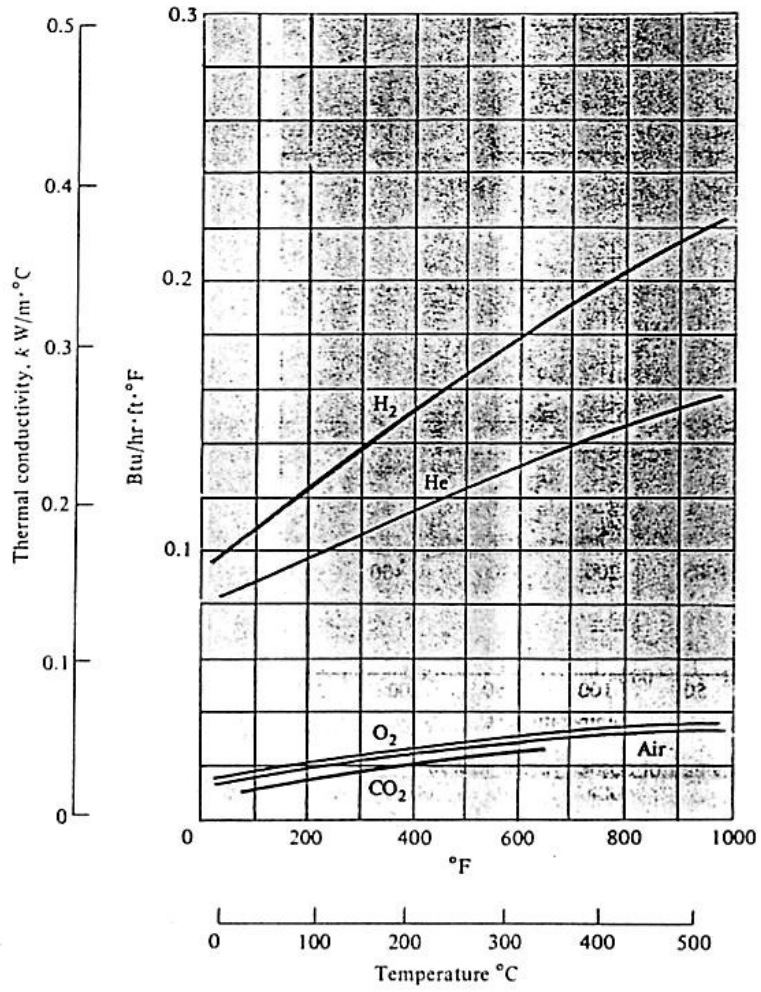


Fig. 1-4 Thermal conductivities of some typical gases [1 W/m · °C = 0.5779 Btu/h · ft · °F].

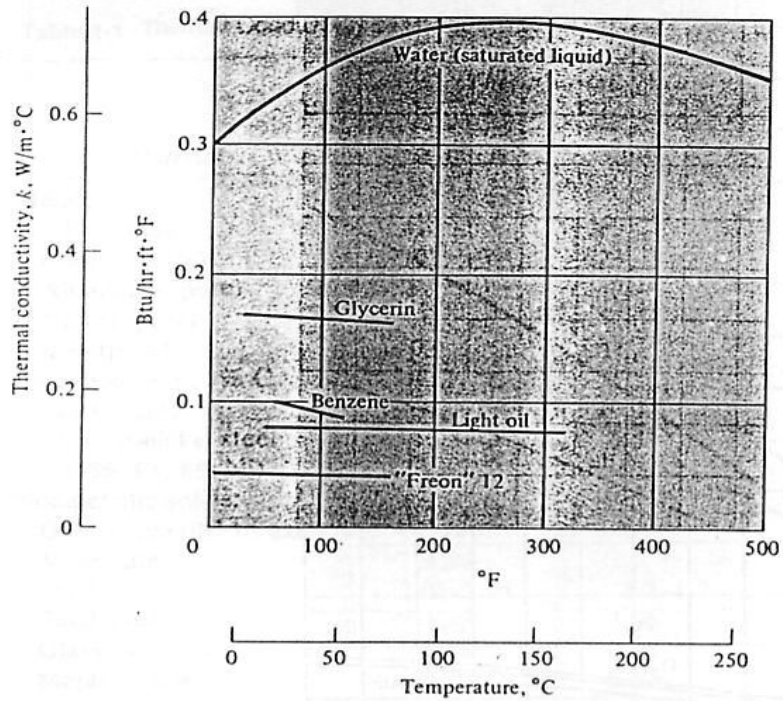


Fig. 1-5 Thermal conductivities of some typical liquids.

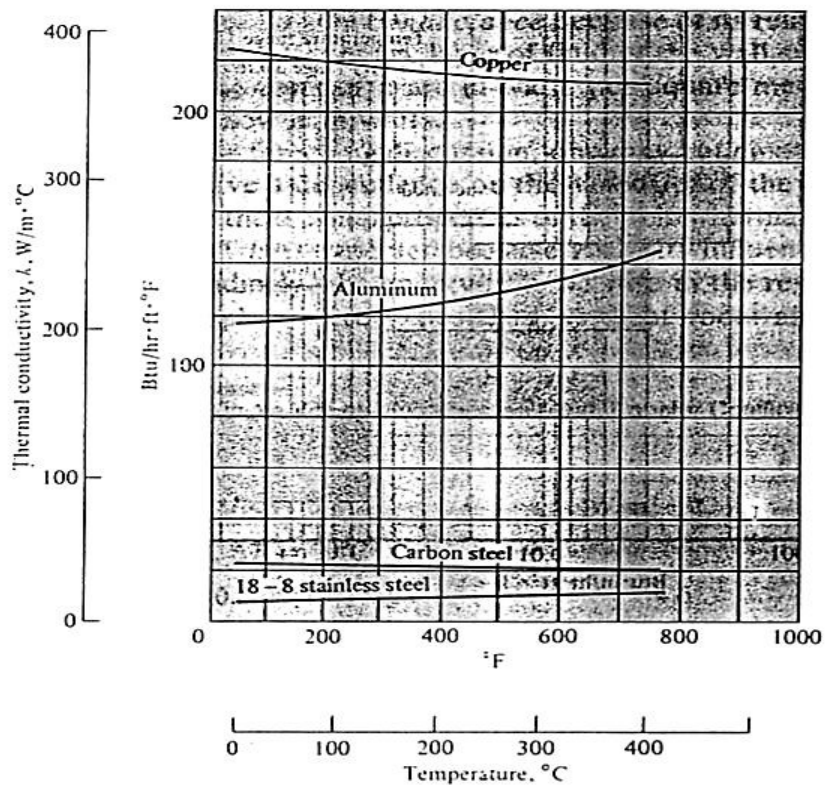
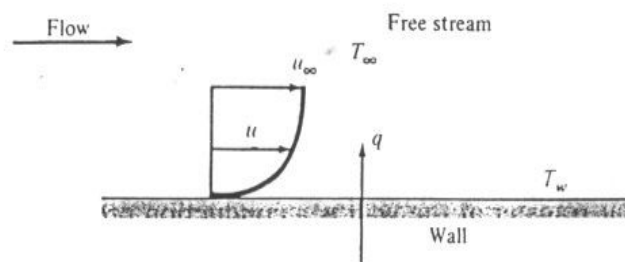


Fig. 1-6 Thermal conductivities of some typical solids.

Perpindahan Kalor Konveksi

Sebuah pelat logam panas akan cepat menjadi dingin apabila ditempatkan didepan sebuah kipas angin dibandingkan jika hanya dibiarkan di udara diam. Kita sebut bahwa kalor di konveksi keluar dan kita sebut prosesnya *perpindahan kalor konveksi*. Misalkan sebuah pelat dipanaskan seperti gambar 8. Suhu pelat adalah T_w dan suhu fluida T_∞ , kecepatan aliran terlihat pada gambar. Kecepatan aliran berkurang sampai nol pada pelat karena efek gaya viskos. Karena kecepatan lapisan fluida pada dinding nol, kalor hanya ditransfer dengan cara konduksi pada titik ini. Karena itu kita bisa menggunakan persamaan (1.1) dengan konduktivitas termal fluida dan gradien temperatur fluida pada dinding. Namun kita tetap menyebutnya konveksi karena gradien temperatur bergantung atas laju fluida dalam mengambil kalor.



Gambar 8. Perpindahan kalor konveksi dari sebuah pelat.

Efek keseluruhan konveksi, dirumuskan dengan Hukum Newton tentang pendinginan:

$$q = hA (T_w - T_\infty) \quad (1-8)$$

Pada persamaan ini, laju perpindahan kalor dikaitkan dengan perbedaan temperatur menyeluruh antara dinding dan fluida dan luas permukaan. Besaran h disebut *koefisien perpindahan kalor konveksi*. Untuk kondisi kompleks, harga h ditentukan secara eksperimen. Koefisien perpindahan kalor kadang-kadang disebut juga *konduktansi film*. Satuan h adalah watt per meter kwadrat per derajat Celsius, jika aliran kalor dalam watt.

Table 1-2 Approximate Values of Convection Heat-Transfer Coefficients

Mode	h	
	W/m ² · °C	Btu/h · ft ² · °F
Free convection, ΔT = 30°C		
Vertical plate 0.3 m [1 ft] high in air	4.5	0.79
Horizontal cylinder, 5-cm diameter, in air	6.5	1.14
Horizontal cylinder, 2-cm diameter, in water	890	157
Forced convection		
Airflow at 2 m/s over 0.2-m square plate	12	2.1
Airflow at 35 m/s over 0.75-m square plate	75	13.2
Air at 2 atm flowing in 2.5-cm-diameter tube at 10 m/s	65	11.4
Water at 0.5 kg/s flowing in 2.5-cm-diameter tube	3500	616
Airflow across 5-cm-diameter cylinder with velocity of 50 m/s	180	32
Boiling water		
In a pool or container	2500–35,000	440–6200
Flowing in a tube	5000–100,000	880–17,600
Condensation of water vapor, 1 atm		
Vertical surfaces	4000–11,300	700–2000
Outside horizontal tubes	9500–25,000	1700–4400

Perpindahan kalor Radiasi

Berbeda dengan perpindahan kalor konduksi dan konveksi dimana perpindahan energi terjadi melalui media, maka kalor juga bisa dipindahkan melalui ruang vakum. Mekanisme ini disebut radiasi elektromagnetik. Radiasi elektromagnetik yang dihasilkan oleh perbedaan temperatur disebut *radiasi termal*.

Dalam termodinamika, pembangkit panas ideal atau *benda hitam* akan memancarkan energi sebanding dengan pangkat empat suhu mutlak benda dan berbanding lurus dengan luas permukaan, atau:

$$q_{\text{pancaran}} = \sigma AT^4 \quad (1-9)$$

Dimana: σ = konstanta proporsional atau konstanta Stefan-Boltzmann

$$= 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4.$$

Energi radiasi bisa juga dirumuskan dengan:

$$q = F\varepsilon F_G \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-11)$$

dimana: $F\varepsilon$ = fungsi emisivitas

F_G = fungsi faktor pandang geometri

Contoh soal 1:

Satu permukaan pelat tembaga yang tebalnya 3 cm, dijaga suhunya pada 400 °C, dan permukaan satu lagi pada 100 °C. Berapa banyak kalor yang dipindahkan pada pelat?. Konduktivitas termal tembaga adalah 370 W/m.°C pada 250 °C.

Jawab:

Dari hukum Fourier:

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

Dengan integrasi didapat:

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dT}{dx} = \frac{-(370)(100 - 400)}{3 \times 10^{-2}} = 3,7 \text{ MW/m}^2$$

Contoh soal 2:

Udara dengan suhu 20 °C meniup pelat panas ukuran 50 x 75 cm yang dijaga suhunya pada 250 °C. Koefisien perpindahan kalor konveksi adalah 25 W/m².°C. Hitunglah perpindahan kalor.

Jawab:

$$\begin{aligned} q &= hA (T_w - T_\infty) \\ &= (25)(0,50)(0,75)(250 - 20) \\ &= 2,156 \text{ kW.} \end{aligned}$$

Contoh soal 3:

Misalkan pelat pada contoh soal 2 terbuat dari baja karbon (1%) tebal 2 cm dan 300 W hilang dari permukaan karena radiasi, hitunglah temperatur pelat bagian dalam.

Jawab:

Kalor yang dikonduksikan melalui pelat mesti sama dengan jumlah kalor yang hilang karena konveksi dan radiasi.

$$q_{kond} = q_{konv} + q_{rad}$$

$$-kA \Delta T / \Delta x = 2,156 + 0,3 = 2,456 \text{ kW}$$

$$\Delta T = \frac{(-2456)(0,02)}{(0,5)(0,75)(43)} = -3,05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

harga k diambil dari tabel 1. Temperatur dalam pelat didapat:

$$T_i = 250 + 3,05 = 253,05 \text{ } ^\circ\text{C}$$