

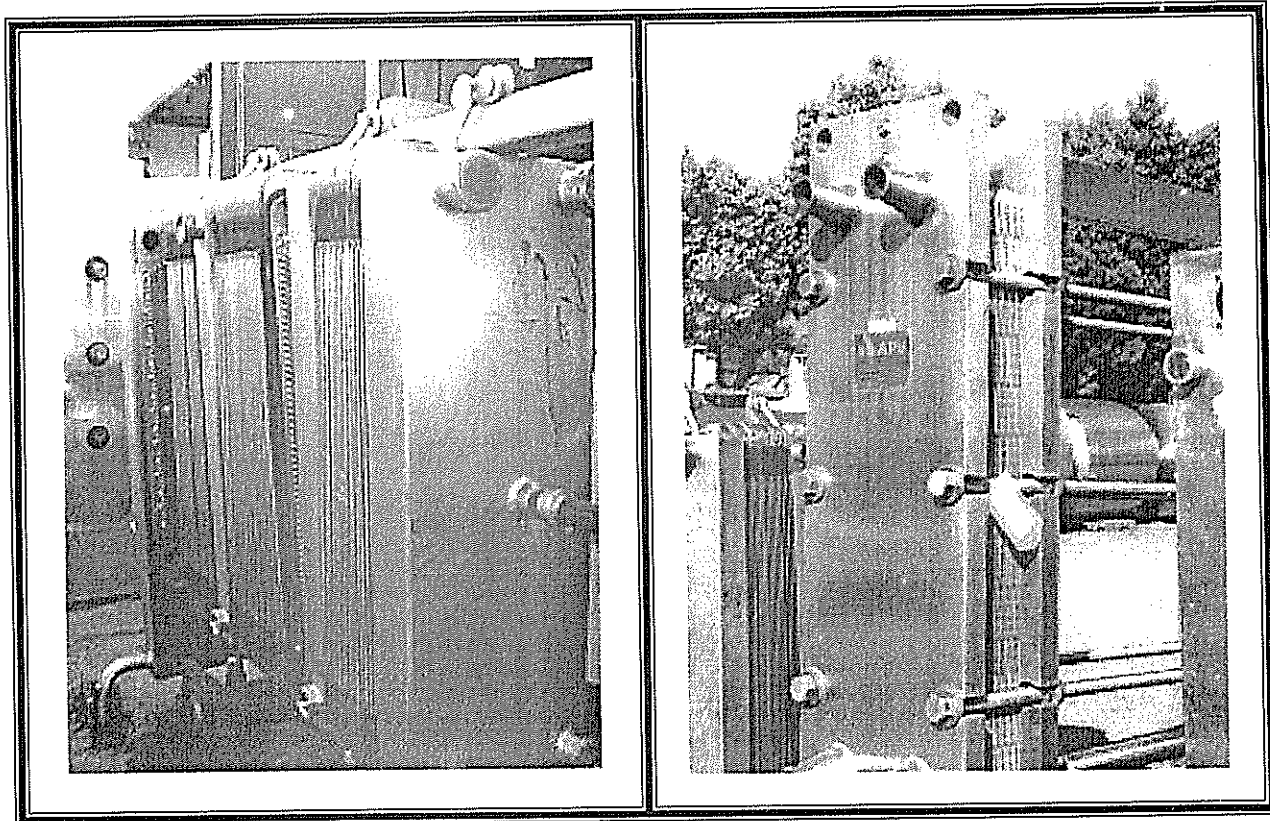
BUKU AJAR

UPT-PUSTAK-UNDIP
No. Daft: 0190/BA/PT/01
Tgl. : 23-7-2009



JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS DIPONEGORO
Jl. Prof. Sudharto, SH, Tembalang, Semarang
Telp/Fax : (024) 7460058
E-mail : tkundip@telkomnet.id

BUKU AJAR
PERPINDAHAN PANAS
BAGIAN I



Disusun Oleh :
LUQMAN BUCHORI



JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS DIPONEGORO
Jl. Prof. Sudharto, SH, Tembalang, Semarang
Telp/Fax : (024) 7460058
E-mail : tkundip@telkomnet.id

KATA PENGANTAR

Bismillahirrohmanirrohim.

Alhamdulillah, kami panjatkan ke hadirat Allah swt. yang telah memberikan rahmatnya kepada kami sehingga buku ajar Perpindahan Panas Bagian I ini akhirnya dapat kami sajikan. Diharapkan dengan adanya buku ajar ini mahasiswa akan dapat lebih mudah mengikuti kuliah dan lebih memahami apa yang menjadi isi dari kuliah ini.

Buku ajar Perpindahan Panas Bagian I ini berisi Dasar-dasar Perpindahan Panas yang meliputi perpindahan panas konduksi, perpindahan panas konveksi dan perpindahan panas radiasi. Sedangkan aplikasi dari dasar-dasar perpindahan panas tersebut akan kami sajikan pada Buku ajar Perpindahan Panas Bagian II. Namun diharapkan mahasiswa tetap secara aktif melaksanakan tugas terstruktur dan tugas mandiri sebab buku ajar ini hanya bersifat membantu dalam tatap muka perkuliahan.

Kami menyadari bahwa buku ajar ini tidak bisa tersaji tanpa bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas bantuan berbagai pihak yang telah membantu terselesainya buku ajar ini.

Akhirnya kami sadari pula bahwa penyusunan buku ajar ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu kami harapkan kritik dan saran yang membangun yang dapat kami gunakan untuk perbaikan buku ajar ini di masa-masa selanjutnya. Semoga buku ajar ini bermanfaat bagi mereka yang membutuhkan.

Semarang, Oktober 2004

Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
Judul	i
Kata Pengantar	ii
Daftar Isi	iii
Daftar Tabel	vi
Daftar Gambar	vii
BAB I PROSES PERPINDAHAN PANAS	I – 1
1.1. Mekanisme Perpindahan Panas	I – 1
1.1.1. Perpindahan Panas Konduksi	I – 2
1.1.1.1. Konduktivitas Thermal (Daya Hantar Panas) ...	I – 4
1.1.2. Perpindahan Panas Konveksi	I – 7
1.1.3. Perpindahan Panas Radiasi	I – 10
1.1.4. Perpindahan Panas Konduksi, Konveksi, Radiasi	I – 11
BAB II PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI	II – 1
2.1. Perpindahan Panas Konduksi Dalam Keadaan Steady State (Tunak) Untuk Koordinat Satu Dimensi	II – 1
2.2. Perpindahan Panas Konduksi Pada Bidang Datar	II – 2
2.2.1. Perpindahan Panas Konduksi Pada Satu Bidang Datar (Slab)	II – 2
2.2.2. Perpindahan Panas Konduksi Pada Satu Seri Bahan	II – 3
2.2.3. Perpindahan Panas Konduksi Melalui Bahan yang Disusun Seri dan Paralel	II – 6
2.3. Perpindahan Panas Konduksi Pada Silinder	II – 8
2.3.1. Perpindahan Panas Konduksi pada Silinder Berongga	II – 8
2.3.2. Perpindahan Panas Konduksi pada Dinding Lapis Rangkap Berbentuk Silinder	II – 9
2.4. Perpindahan Panas Konduksi Pada Bola	II – 11
2.4.1. Perpindahan Panas Konduksi pada Bola Berongga	II – 11

	2.4.2.	Perpindahan Panas Konduksi pada Dinding Lapis Rangkap Berbentuk Bola	II – 12
	2.5.	Perpindahan Panas Konduksi Koordinat Satu/Dua/Tiga Dimensi	II – 14
	2.5.1.	Koordinat Cartesian (x, y, z)	II – 14
	2.5.2.	Koordinat Silinder (r, z, θ)	II – 17
	2.5.3.	Koordinat Bola (r, θ , ϕ)	II – 17
	2.6.	Sistem Satu Dimensi Dengan Sumber Panas	II – 18
	2.6.1.	Sumber Panas pada Bidang Datar	II – 18
	2.6.2.	Sumber Panas pada Silinder	II – 19
	2.6.2.1.	Silinder Pejal	II – 19
	2.6.2.2.	Silinder Berongga	II – 20
BAB III		PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI DAN KONVEKSI SECARA SIMULTAN	III – 1
	3.1.	Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh (Overall Heat Transfer Coefficient, U)	III – 1
	3.1.1.	Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh Pada Bidang Datar	III – 1
	3.1.2.	Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh Pada Silinder ...	III – 3
	3.1.3.	Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh Pada Bola	III – 5
	3.2.	Tebal Isolasi Kritis	III – 6
	3.2.1.	Silinder Terisolasi	III – 6
	3.2.2.	Bola Terisolasi	III – 8
BAB IV		PERPINDAHAN PANAS RADIASI	IV – 1
	4.1.	Sifat-sifat Radiasi	IV – 2
	4.2.	Identitas Kirchhoff	IV – 3
	4.3.	Faktor Pandangan	IV – 3
	4.4.	Hubungan Berbagai Faktor Bentuk	IV – 7
	4.5.	Pertukaran Panas Antara Benda Tak Hitam	IV – 7
	4.6.	Perpindahan Panas Radiasi Antara Dua Permukaan	IV – 9
	4.7.	Perpindahan Panas Radiasi Antara Tiga Permukaan	IV – 10

	Perpindahan Panas Radiasi Antara Dua Bidang Datar Yang	
4.8.	Dihubungkan Dengan Bidang Yang Tidak Dapat Menghantarkan Panas Tetapi Dapat Memantulkan Semua Panas Yang Diterima	IV – 11
4.9.	Bidang Sejajar Tak-Hingga	IV – 13

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1.1. Konduktivitas Termal Berbagai Bahan pada 0°C	I – 7
Tabel 1.2. Nilai Kira-kira Koefisien Perpindahan Panas Konveksi	I – 9

DAFTAR GAMBAR

		Halaman
Gambar 1.1.	Perpindahan panas konduksi pada bahan dengan ketebalan berbeda .	I – 2
Gambar 1.2.	Perpindahan panas konduksi pada bahan dengan panjang berbeda ...	I – 3
Gambar 1.3.	Perpindahan panas konduksi pada bahan dengan Δ suhu berbeda	I – 3
Gambar 1.4.	Konduktivitas termal beberapa gas	I – 5
Gambar 1.5.	Konduktivitas termal beberapa zat cair	I – 5
Gambar 1.6.	Konduktivitas termal beberapa zat padat	I – 6
Gambar 1.7.	Ruangan dengan sumber panas pada salah satu sudutnya	I – 9
Gambar 1.8.	Pergerakan udara pada peristiwa perpindahan konveksi	I – 10
Gambar 1.9.	Perpindahan panas dengan cara konduksi, konveksi dan radiasi	I – 11
Gambar 2.1.	Perpindahan panas melalui satu slab dinding	II – 2
Gambar 2.2.	Perpindahan panas melalui dinding yang disusun seri	II – 4
Gambar 2.3.	Perpindahan panas melalui dinding yang disusun seri dan paralel	II – 6
Gambar 2.4.	Aliran panas satu dimensi melalui silinder berongga	II – 8
Gambar 2.5.	Aliran panas satu dimensi melalui silinder berlapis	II – 10
Gambar 2.6.	Aliran panas satu dimensi melalui bola berongga	II – 11
Gambar 2.7.	Aliran panas satu dimensi melalui bola berlapis	II – 13
Gambar 2.8.	Volume unsur untuk analisis konduksi-panas satu-dimensi	II – 14
Gambar 2.9.	Volume unsur untuk analisis konduksi-panas tiga-dimensi koordinat Cartesian	II – 16
Gambar 2.10.	Volume unsur untuk analisis konduksi-panas tiga-dimensi koordinat-Silinder	II – 17
<hr/>		
Gambar 2.11.	Volume unsur untuk analisis konduksi-panas tiga-dimensi koordinat Bola	II – 17
Gambar 2.12.	Perpindahan panas konduksi satu-dimensi pada bidang datar dengan pembangkitan panas	II – 18
Gambar 2.13.	Perpindahan panas konduksi satu-dimensi pada silinder pejal dengan pembangkitan panas	II – 20

Gambar 2.14.	Perpindahan panas konduksi satu-dimensi pada silinder berongga dengan pembangkitan panas	II – 21
Gambar 3.1.	Perpindahan panas menyeluruh melalui dinding datar	III – 1
Gambar 3.2.	Perpindahan panas menyeluruh melalui silinder berongga	III – 3
Gambar 3.3.	Perpindahan panas menyeluruh melalui bola berongga	III – 5
Gambar 3.4.	Perpindahan panas menyeluruh melalui pipa terisolasi	III – 6
Gambar 3.5.	Perpindahan panas menyeluruh melalui bola terisolasi	III – 8
Gambar 4.1.	Sifat-sifat benda yang menerima energi radiasi	IV – 2
Gambar 4.2.	Faktor bentuk radiasi untuk radiasi antara dua siku-empat sejajar	IV – 5
Gambar 4.3.	Faktor bentuk radiasi untuk radiasi antara dua piring sejajar	IV – 5
Gambar 4.4.	Faktor bentuk radiasi untuk dua siku-empat tegak lurus dengan satu sisi bersama	IV – 6
Gambar 4.5.	Faktor bentuk radiasi untuk dua silinder konsentrik	IV – 6
Gambar 4.6.	Faktor bentuk radiasi untuk dua piring konsentrik sejajar	IV – 7

DAFTAR PUSTAKA

1. Adam, Mc. W., (1958), *Heat Transmision*, third edition, International Student Edition, Mc Graw- Hill, Kogakusha, Ltd.
2. Holman, J.P., (1986), *Heat Transfer*, sixth edition, McGraw Hill, Ltd., New York.
3. Incopera, F.P. and Weitt, D.P., (1981), *Fundamentals of Heat Transfer*, John Willey & Sons Inc., New York.
4. Kern, D.Q., (1958), *Process Heat Transfer*, International Student Edition, McGraw Hill Kogakusha, Ltd., New York.
5. Mikheyev, M., (1986), *Fundamentals of Heat Transfer*, John Willey & Sons Inc., New York.
6. Pitts, D.R., and Sissom, L.E., (1987), *Perpindahan Kalor*, Erlangga, Jakarta
7. Ozisik, M. N., (1985), *Heat Transfer, a Basic Approach*, Mc. Graw-Hill International Editions, Kogakusha, Ltd.
8. Prijono, A. dan Kreith, F., (1986), *Prinsip-prinsip Perpindahan Panas*, edisi ketiga, Erlangga, Jakarta.

BAB I

PROSES PERPINDAHAN PANAS

Perpindahan panas adalah ilmu yang mempelajari tentang laju perpindahan panas diantara material/benda karena adanya perbedaan suhu (panas dan dingin). Perpindahan panas terjadi karena adanya perbedaan suhu. Panas akan mengalir dari tempat yang suhunya tinggi ke tempat yang suhunya lebih rendah.

Untuk dapat memahami konsep perpindahan panas diperlukan pengetahuan tentang persamaan differensial biasa/parsial, pengertian mekanika fluida yang akan banyak membantu dalam masalah konveksi dan konsep neraca energi termodinamika yang juga bermanfaat dalam berbagai pengembangan analitik.

Ilmu perpindahan panas sangat berguna sekali dalam merencanakan alat-alat penukar panas. Kegunaan itu antara lain adalah :

1. Untuk merencanakan alat-alat penukar panas (*heat exchanger*).
2. Untuk menghitung kebutuhan media pemanas/pendingin pada suatu reboiler atau kondensor dalam kolom destilasi.
3. Untuk perhitungan *furnace*/dapur yang menggunakan konsep perpindahan panas radiasi.
4. Untuk perancangan ketel uap/*boiler*.
5. Untuk perancangan alat-alat penguap (*evaporator*).
6. Untuk perancangan reaktor kimia

Peristiwa perpindahan panas sangat banyak dijumpai dalam industri, misalnya pemanfaatan panas yang terbawa hasil akhir ataupun hasil antara untuk memanaskan umpan yang akan masuk ke reaktor dalam sebuah alat penukar panas, perpindahan panas dari sebuah pipa uap ke udara, pembuangan panas pada sebuah pembangkit tenaga.

1.1. MEKANISME PERPINDAHAN PANAS

Perpindahan panas terjadi menurut tiga mekanisme yaitu :

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

1.1.1. PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI

Perpindahan panas konduksi adalah proses perpindahan panas jika panas mengalir dari tempat yang suhunya tinggi ke tempat yang suhunya lebih rendah, tetapi media untuk perpindahan panas tetap.

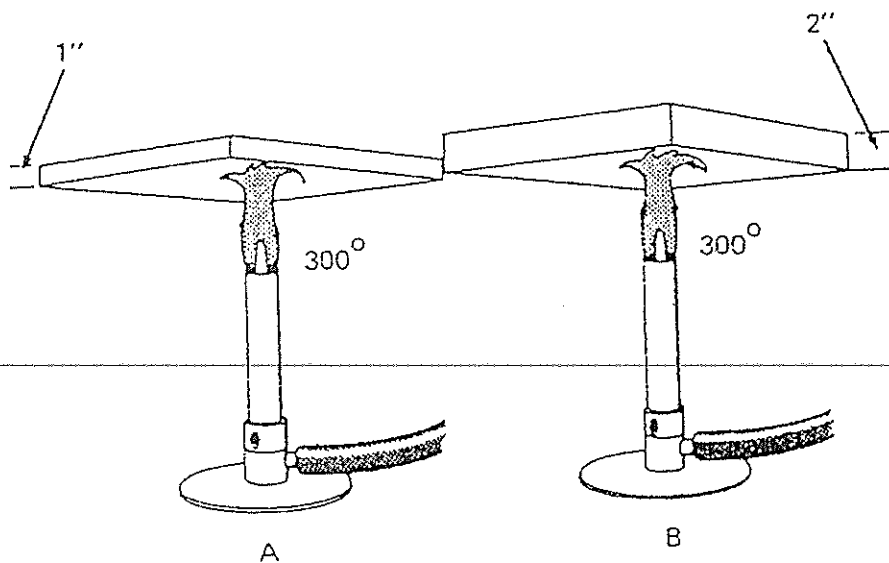
Perpindahan panas secara konduksi tidak hanya terjadi pada padatan saja tetapi bisa juga terjadi pada cairan ataupun gas, hanya saja konduktivitas terbesar ada pada padatan. Jadi,

konduktivitas padatan > konduktivitas cairan dan gas

Jika media perpindahan panas konduksi berupa gas, molekul-molekul gas yang suhunya tinggi akan bergerak dengan kecepatan yang lebih tinggi daripada molekul gas yang suhunya lebih rendah. Jika ada perbedaan suhu, molekul-molekul pada daerah yang suhunya tinggi akan memberikan panasnya kepada molekul yang suhunya lebih rendah pada saat terjadi tumbukan dengan molekul yang suhunya lebih rendah.

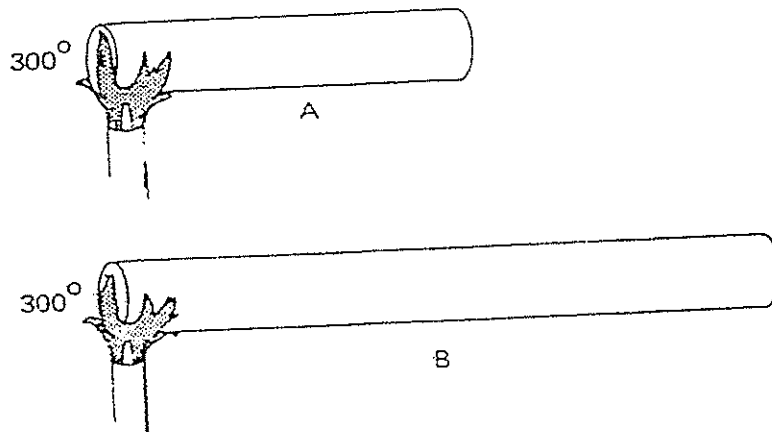
Jika media perpindahan panas konduksi berupa cairan, mekanisme perpindahan panas yang terjadi sama dengan konduksi dengan media gas, hanya kecepatan gerak molekul cairan lebih lambat daripada molekul gas. Tetapi jarak antara molekul-molekul pada cairan lebih pendek daripada jarak antara molekul-molekul pada fase gas.

Contoh perpindahan panas konduksi :



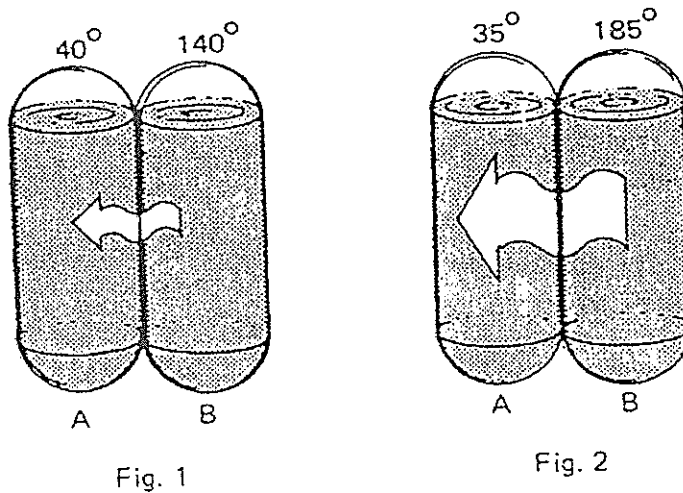
Gambar 1.1. Perpindahan panas konduksi pada bahan dengan ketebalan berbeda

Diantara 2 bahan tersebut, mana yang lebih lama naik suhunya ?



Gambar 1.2. Perpindahan panas konduksi pada bahan dengan panjang berbeda

Diantara 2 bahan tersebut, mana yang lebih lama panasnya ?



Gambar 1.3. Perpindahan panas konduksi pada bahan dengan Δ suhu berbeda

Diantara 2 bahan tersebut, mana yang lebih cepat konduksinya ?

Persamaan dasar dari konsep perpindahan panas konduksi adalah hukum Fourier. Hukum Fourier dinyatakan dengan :

$$q_k = -\frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

atau

$$\frac{q_k}{A} = k \left(-\frac{dT}{dx} \right) \quad (1.2)$$

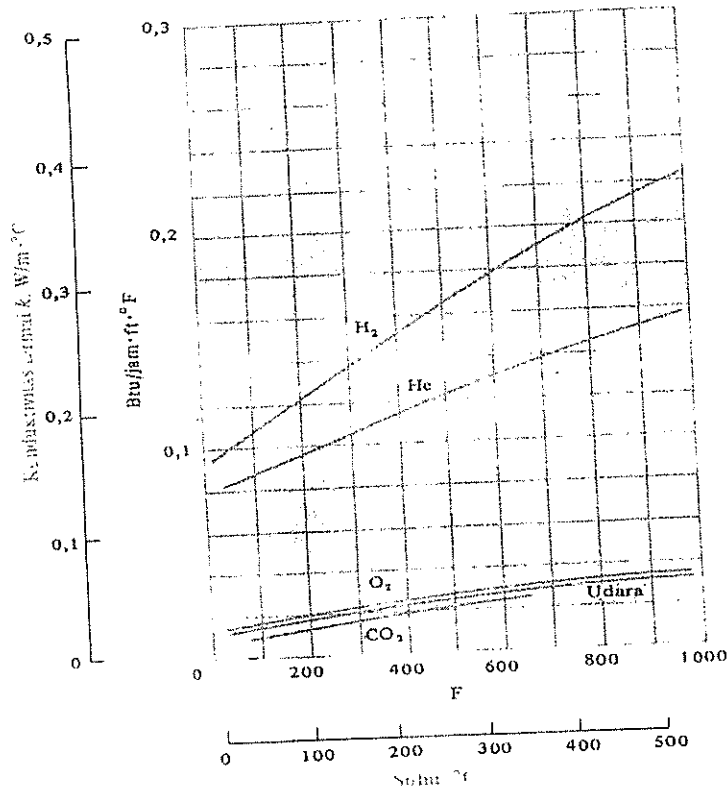
dimana :	T	=	suhu, °C (°F)
	x	=	jarak/tebal dinding, m (ft)
	A	=	luas dinding (luas perpindahan panas), m ² (ft ²)
	k	=	konduktivitas termal, W/m.°C (Btu/h.ft.°F) (konstanta proporsionalitas)
	q _k	=	laju perpindahan panas konduksi, Watt (Btu/h)
	$\frac{q_k}{A}$	=	laju perpindahan panas per satuan luas (<i>heat flux</i>) W/m ² (Btu/h.ft ²)

1.1.1.1. KONDUKTIVITAS TERMAL (DAYA HANTAR PANAS)

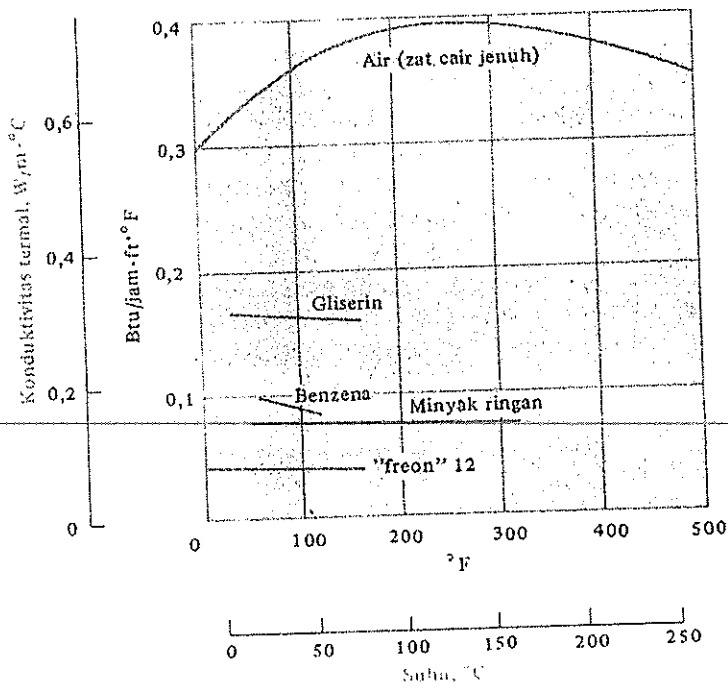
Daya hantar panas atau konduktivitas adalah sifat bahan yang menunjukkan berapa cepat bahan itu dapat menghantarkan panas konduksi.

Atau k adalah jumlah panas yang mengalir tiap satuan waktu melalui tebal dinding 1 ft yang luasnya 1 ft² apabila diberi beda suhu 1°.

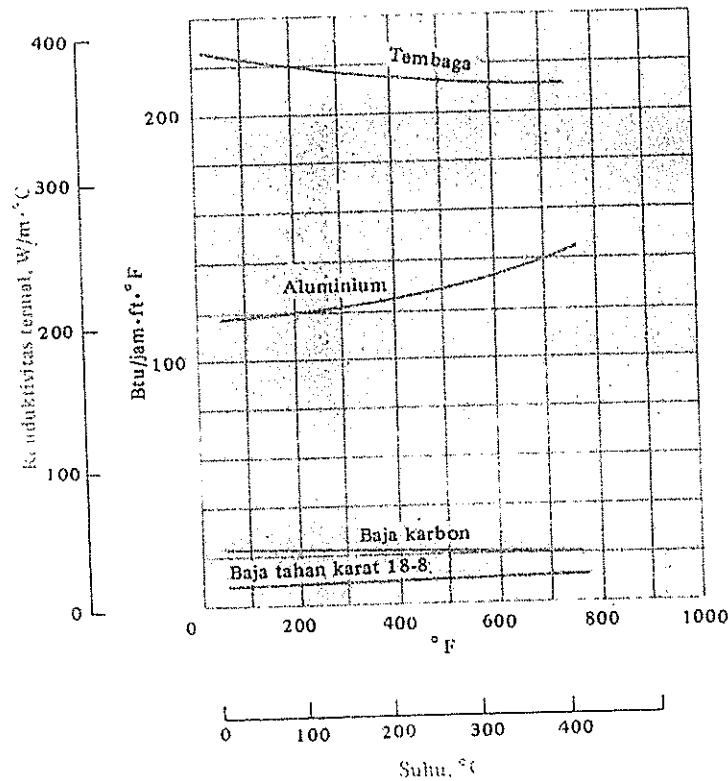
Daya hantar panas suatu bahan dapat diukur berdasarkan hukum Fourier. Pada umumnya daya hantar panas suatu bahan harus diukur dengan mengadakan percobaan. Daya hantar panas biasanya dipengaruhi oleh suhu. Seperti yang terlihat pada gambar 1.4, pengaruh suhu pada konduktivitas bermacam-macam gas, gambar 1.5, pengaruh suhu pada konduktivitas bermacam-macam cairan dan gambar 1.6, pengaruh suhu pada konduktivitas bermacam-macam logam.



Gambar 1.4. Konduktivitas termal beberapa gas



Gambar 1.5. Konduktivitas termal beberapa zat cair



Gambar 1.6 Konduktivitas termal beberapa zat padat

Bahan yang mempunyai konduktivitas yang baik disebut dengan KONDUKTOR, misalnya logam (tembaga, aluminium, perak, dsb). Sedangkan bahan yang mempunyai konduktivitas jelek disebut ISOLATOR, contohnya adalah asbes, wol kaca, dsb.

Namun dalam hal ini, pada penjabaran rumus perpindahan panas konduksi, nilai konduktivitas panas selalu dianggap tetap terhadap suhu, meskipun disadari bahwa pada umumnya konduktivitas panas dipengaruhi suhu, tetapi kenyataan pengaruh suhu pada konduktivitas panas tidak begitu besar. Untuk benda yang konduktivitas panasnya tidak dipengaruhi atau/atau letak titik dalam benda disebut ISOTROPIK. Tetapi, untuk benda yang berserat, misalnya kayu, maka konduktivitas panas yang diukur sepanjang serat kayu pada penampang kayu akan berbeda disebut ANISOTROPIK.

Tabel 1.1. Konduktivitas Termal Berbagai Bahan pada 0°C

Bahan	Konduktivitas Termal (k)	
	W/m.°C	Btu/h.ft.°F
Logam		
Perak (murni)	410	237
Tembaga (murni)	385	223
Aluminium (murni)	202	117
Nikel (murni)	93	54
Besi (murni)	73	42
Baja karbon, 1% C	43	25
Timbal (murni)	35	20,3
Baja krom-nikel (18% Cr, 8% Ni)	16,3	9,4
Bukan Logam		
Kuarsa (sejajar sumbu)	41,6	24
Magnesit	4,15	2,4
Marmar	2,08 – 2,94	1,2 – 1,7
Batu pasir	1,83	1,06
Kaca jendela	0,78	0,45
Kayu maple atau ek	0,17	0,096
Serbuk gergaji	0,059	0,034
Wol kaca	0,038	0,022
Zat Cair		
Air raksa	8,21	4,74
Air	0,556	0,327
Ammonia	0,540	0,312
Minyak lumas, SAE 50	0,147	0,085
Freon 12, CCl ₂ F ₂	0,073	0,042
Gas		
Hidrogen	0,175	0,101
Helium	0,141	0,081
Udara	0,024	0,0139
Uap air (jenuh)	0,0206	0,0119
Karbon dioksida	0,0146	0,00844

1.1.2. PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI

Perpindahan panas konveksi adalah proses perpindahan panas dimana cairan atau gas yang suhunya tinggi mengalir ke tempat yang suhunya lebih rendah, memberikan panas pada permukaan yang suhunya lebih rendah.

Perpindahan panas terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir di sekitarnya. Jadi perpindahan panas ini memerlukan media penghantar berupa fluida (cairan atau gas).

Perpindahan panas secara konveksi terjadi melalui 2 cara yaitu :

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

Adalah 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*).

Adalah perpindahan panas yang aliran gas atau cairannya disebabkan adanya tenaga dari luar.

Contoh : plat panas dihembus udara dengan kipas/blower.

Persamaan dasar dari konsep perpindahan panas konveksi adalah hukum Newton. Hukum Newton dinyatakan dengan :

$$q_c = h_c A (T_w - T_s) \quad (1.3)$$

atau

$$\frac{q_c}{A} = h_c (T_w - T_s) \quad (1.4)$$

dimana :

T	=	suhu, °C (°F)
A	=	luas permukaan, m ² (ft ²)
h _c	=	koefisien perpindahan panas konveksi (<i>convection heat transfer coefficient</i>), W/m ² .°C (Btu/h.ft ² .°F) (konstanta proporsionalitas)
q _c	=	laju perpindahan panas konveksi, Watt (Btu/h)
$\frac{q_c}{A}$	=	laju perpindahan panas per satuan luas (<i>heat flux</i>)

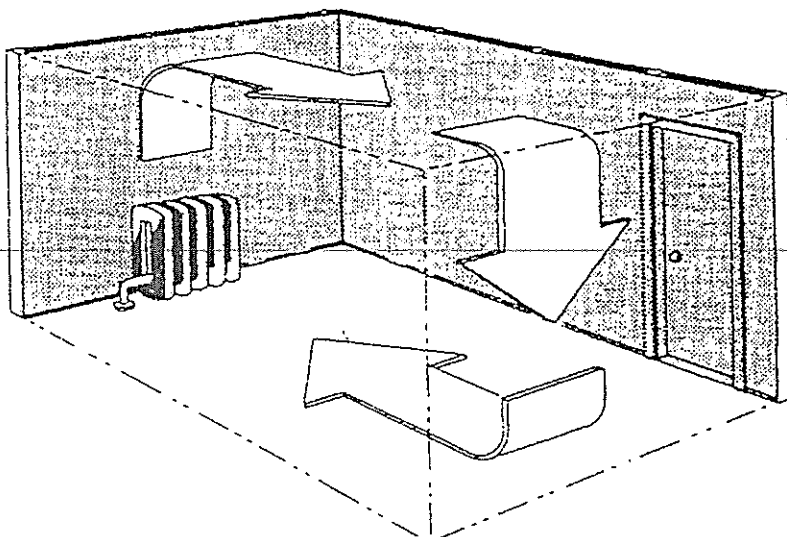
$$W/m^2 \text{ (Btu/h.ft}^2\text{)}$$

Pada beberapa kasus tertentu nilai h_c dapat dijabarkan dengan cara analitik, tetapi pada umumnya h_c harus diukur dengan mengadakan percobaan.

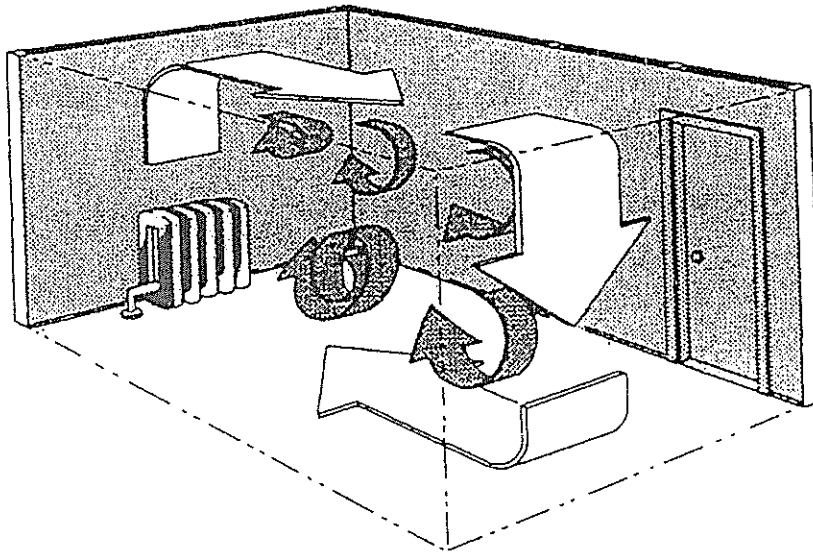
Tabel 1.2. Nilai Kira-kira Koefisien Perpindahan Panas Konveksi

Bahan	h_c	
	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	$Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$
Konveksi bebas, $\Delta T = 30^\circ C$		
Plat vertical, tinggi 0,3 m (1 ft) di udara	4,5	0,79
Silinder horizontal, diameter 5 cm di udara	6,5	1,14
Silinder horizontal, diameter 2 cm dalam air	890	157
Konveksi paksa		
Aliran udara 2 m/s di atas plat bujur sangkar 0,2 m	12	2,1
Aliran udara 35 m/s di atas plat bujur sangkar 0,75 m	75	13,2
Udara 2 atm mengalir di dalam tabung diameter 2,5 cm, kecepatan 10 m/s	65	11,4
Air 0,5 kg/s mengalir di dalam tabung 2,5 cm	3500	616
Aliran udara melintas silinder diameter 5 cm kecepatan 50 m/s	180	32
Air mendidih		
Dalam kolam atau bejana	2500 – 35.000	440 – 6200
Mengalir dalam pipa	5000 – 100.000	880 – 17.600
Pengembunan uap air, 1 atm		
Muka vertikal	4000 – 11.300	700 – 2000
Di luar tabung horisontal	9500 – 25.000	1700 – 4400

Contoh peristiwa perpindahan secara konveksi



Gambar 1.7. Ruang dengan sumber panas pada salah satu sudutnya



Gambar 1.8. Pergerakan udara pada peristiwa perpindahan konveksi

1.1.3. PERPINDAHAN PANAS RADIASI

Perpindahan panas radiasi adalah perpindahan panas yang terjadi karena pancaran/sinaran/ radiasi gelombang elektromagnetik

Perpindahan panas radiasi berlangsung elektromagnetik dengan panjang gelombang pada interval tertentu. Jadi perpindahan panas radiasi tidak memerlukan media, sehingga perpindahan panas dapat berlangsung dalam ruangan hampa udara.

Contoh : panas matahari yang sampai ke bumi.

Benda yang dapat memancarkan panas dengan sempurna disebut radiator yang sempurna dan dikenal sebagai benda hitam (*black body*). Sedangkan benda yang tidak dapat memancarkan panas dengan sempurna disebut dengan benda abu-abu (*gray body*).

Persamaan dasar dari konsep perpindahan panas konveksi adalah hukum Stefan-Boltzman. Hukum Stefan-Boltzman dinyatakan dengan :

$$q_r = \epsilon \sigma A T^4 \quad (1.5)$$

dimana

ϵ	=	emisivitas
T	=	suhu absolut benda, K ($^{\circ}$ R)
A	=	luas permukaan, m^2 (ft^2)
q_r	=	laju perpindahan panas radiasi, Watt (Btu/h)

$$\sigma = \text{konstanta Stefan-Boltzman,}$$

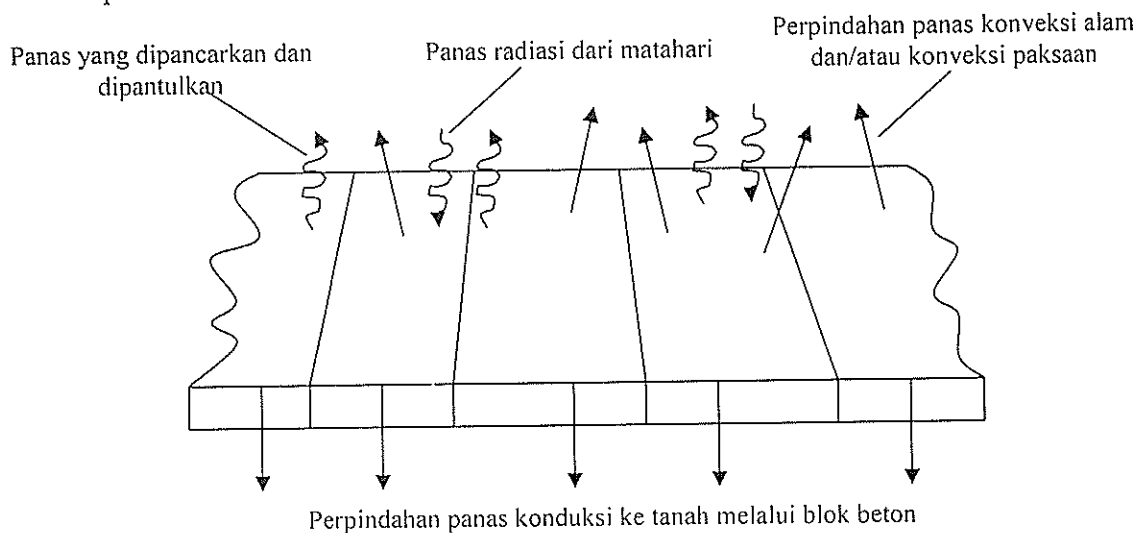
$$5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \text{ (} 0,1713 \times 10^{-8} \text{ Btu/h.ft}^2 \cdot \text{°R}^4 \text{)}$$

(konstanta proporsionalitas)

Untuk benda hitam, emisivitasnya berharga satu, sedangkan untuk benda abu-abu, nilai emisivitasnya selalu lebih kecil dari satu.

1.1.4. PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI, KONVEKSI, RADIASI

Pada umumnya tiga macam mekanisme perpindahan panas konduksi, konveksi dan radiasi berlangsung bersama-sama. Sebagai contoh adalah blok beton tempat pejalan kaki menerima panas radiasi dari matahari.



Gambar 1.9. Perpindahan panas dengan cara konduksi, konveksi dan radiasi

Blok beton menerima panas radiasi dari matahari, sebagian panas radiasi ini diabsorpsi sehingga suhu beton naik. Sebagian panas radiasi dari matahari akan dipantulkan oleh blok beton, tetapi tidak ada panas radiasi yang diteruskan karena blok beton bersifat suram. Karena suhu blok beton naik, maka akan memancarkan panas ke udara lebih banyak daripada sebelumnya. Karena suhu blok lebih tinggi daripada suhu udara yang ada di dekatnya maka akan terjadi perpindahan panas secara konveksi bebas dan/atau konveksi paksaan tergantung pada kecepatan angin. Jika kecepatan angin kecil, terjadi perpindahan panas secara konveksi bebas, sedangkan pada saat angin kencang terjadi perpindahan panas konveksi paksaan dengan koefisien konveksi yang lebih besar. Akhirnya juga ada perpindahan panas konduksi ke tanah melalui blok beton.

TUGAS/LATIHAN

Carilah penerapan perpindahan panas pada alat-alat dalam industri beserta dengan mekanisme perpindahan panas yang terjadi.

BAB II

PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI

2.1. PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI DALAM KEADAAN STEADY STATE (TUNAK) UNTUK KOORDINAT SATU DIMENSI

Dengan menggabungkan persamaan neraca panas pada suatu elemen volume dengan hukum Fourier untuk perpindahan panas konduksi dapat diperoleh persamaan distribusi suhu pada suatu benda.

Distribusi suhu pada suatu benda bisa terjadi pada tiga arah dan dipengaruhi oleh waktu. Jika distribusi suhu dipengaruhi waktu, maka disebut perpindahan panas dalam keadaan tak tunak (*unsteady state, transient*). Tetapi jika distribusi suhu tidak dipengaruhi waktu disebut perpindahan panas dalam keadaan tunak (*steady state*).

Jika perbedaan suhu hanya terjadi pada satu arah disebut perpindahan panas satu arah (satu dimensi), demikian juga jika perbedaan suhu terjadi pada dua atau tiga arah, maka disebut perpindahan panas dua atau tiga dimensi. Perpindahan panas disebut dalam keadaan tunak satu dimensi, jika perbedaan suhu tidak dipengaruhi waktu dan terjadi hanya pada satu arah.

Perbedaan suhu pada perpindahan panas konduksi meliputi tiga koordinat yaitu koordinat Cartesian (bidang datar, x, y, z), koordinat silinder (r, z, θ) dan koordinat bola (r, θ, ϕ). Dalam kategori sistem satu dimensi ini termasuk berbagai bentuk fisik yang berlainan: sistem silinder dan bola adalah satu dimensi bila suhu benda hanya merupakan fungsi jarak radial dan tidak tergantung dari sudut azimuth atau letak pada poros. Dalam beberapa masalah dua-dimensi, pengaruh koordinat ruang kedua mungkin kecil sekali sehingga dapat diabaikan dan soal-soal perpindahan panas dimensi rangkap dapat didekati dengan analisis satu dimensi.

Persamaan Fourier untuk ketiga koordinat dapat dituliskan dalam bentuk persamaan differensial parsial sebagai berikut:

Untuk koordinat kartesian :

$$\text{- arah } x \quad : \quad q_x = -k A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

$$\text{- arah } y \quad : \quad q_y = -k A \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.2)$$

$$\text{- arah } z \quad : \quad q_z = -k A \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.3)$$

Untuk koordinat silinder :

$$\text{- arah } r \quad : q_r = -k A \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2.4)$$

$$\text{- arah } \theta \quad : q_\theta = -\frac{k}{r} A \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad (2.5)$$

$$\text{- arah } z \quad : q_z = -k A \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.6)$$

Untuk koordinat bola :

$$\text{- arah } r \quad : q_r = -k A \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2.7)$$

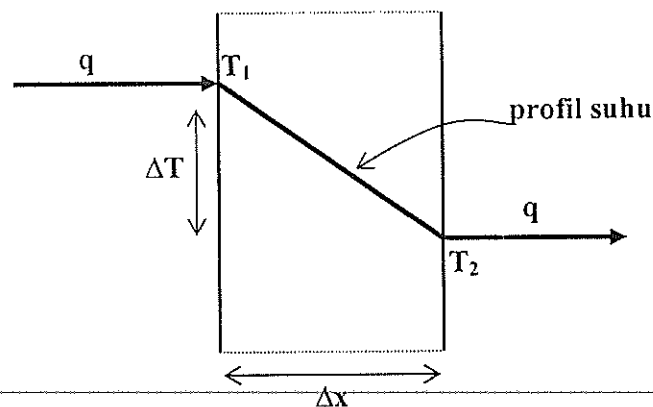
$$\text{- arah } \theta \quad : q_\theta = -\frac{k}{r} A \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad (2.8)$$

$$\text{- arah } \phi \quad : q_\phi = -\frac{k}{r \sin \theta} A \frac{\partial T}{\partial \phi} \quad (2.9)$$

2.2. PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI PADA BIDANG DATAR

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

Gambar 2.1. menunjukkan distribusi suhu pada sebuah slab datar dengan koordinat Cartesian terhadap sumbu x



Gambar 2.1. Perpindahan panas melalui satu slab dinding

Hukum Fourier untuk bidang datar koordinat satu dimensi ke arah sumbu x dapat dituliskan sbb :

$$q = -k A \frac{dT}{dx} = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.10)$$

atau bisa juga dituliskan:

$$q = -\frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{kA}} \quad (2.11)$$

Laju perpindahan panas (q) dapat dipandang sebagai aliran; sedang gabungan dari konduktivitas termal (k), tebal bahan (Δx) dan luas (A) merupakan tahanan terhadap aliran ini. Suhu (ΔT) merupakan fungsi potensial atau pendorong. Dengan demikian persamaan Fourier dapat dituliskan:

$$\text{Aliran kalor} = \frac{\text{beda potensial termal}}{\text{tahanan termal}}$$

Hubungan di atas serupa dengan Hukum Ohm dalam rangkaian listrik dimana hukum Ohm dapat dituliskan dengan

$$\begin{aligned} \text{Aliran} &= \frac{\text{potensial}}{\text{tahanan}} \\ I = \frac{V}{R} &\equiv q = -\frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{kA}} \end{aligned} \quad (2.12)$$

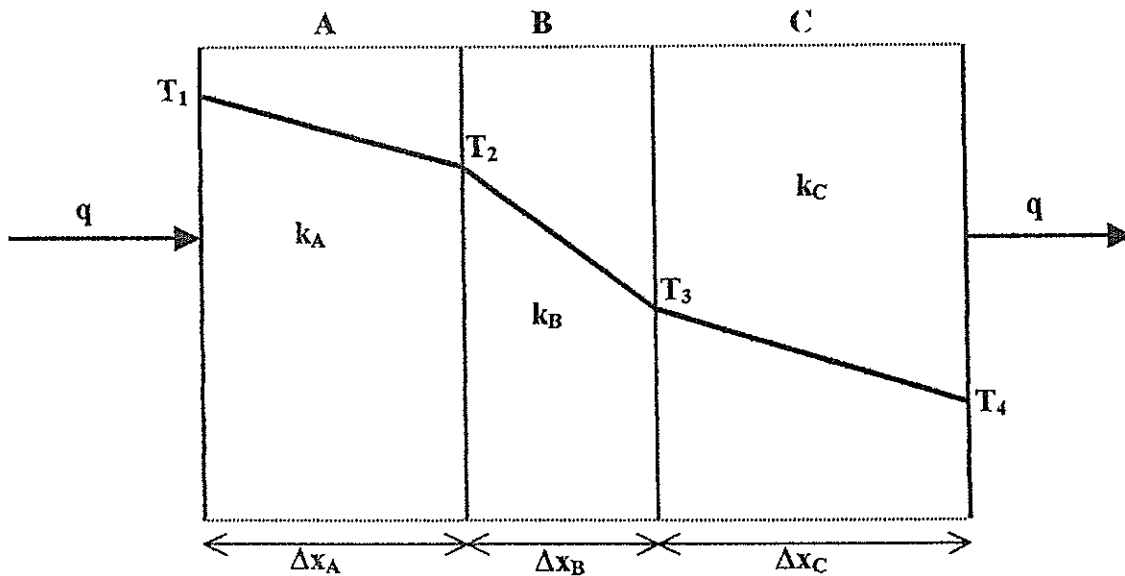
Bila aliran panas dinyatakan dengan analogi listrik persamaan menjadi :

$$q = -\frac{\Delta T}{R} = -\frac{(T_2 - T_1)}{\frac{\Delta x}{kA}} \quad (2.13)$$

$$q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x}{kA}} \quad (2.14)$$

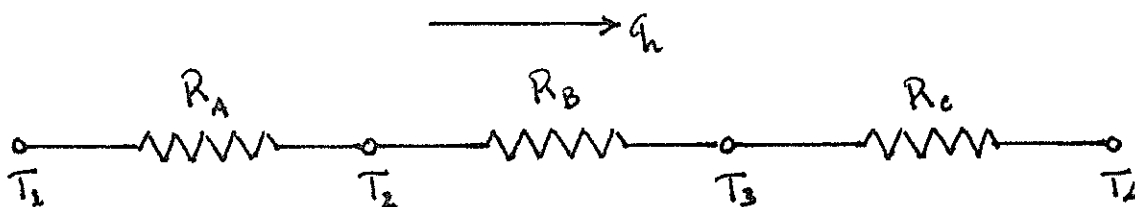
2.2.2. Perpindahan Panas Konduksi Pada Satu Seri Bahan

Suatu aliran panas dilewatkan pada bidang datar yang disusun berlapis-lapis secara seri dengan bahan yang berbeda-beda dengan harga konduktivitas masing-masing seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2. Bahan tersebut mempunyai tebal 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 .



Gambar 2.2. Perpindahan panas melalui dinding yang disusun seri

Jika perpindahan panas di atas ditulis dalam analogi listrik bahan yang disusun secara seri :



Persamaan aliran panas dari hukum Fourier untuk seluruh bidang datar koordinat satu dimensi ke arah sumbu x adalah :

$$q = \frac{\Delta T_{\text{menyeluruh}}}{\sum R_{\text{th}}} \quad (2.15)$$

dimana R_{th} adalah tahanan termal dari masing-masing bahan tersebut.

Untuk bahan yang disusun secara seri, jumlah tahanan termal dapat dituliskan:

$$R_{\text{th}} = R_A + R_B + R_C + \dots \quad (2.16)$$

Sehingga persamaan aliran panas untuk bidang yang disusun seri adalah :

$$q = \frac{\Delta T_{\text{menyeluruh}}}{\sum R_{\text{th}}} = \frac{\Delta T}{R_A + R_B + R_C} \quad (2.17)$$

atau jika dituliskan secara menyeluruh, persamaan di atas menjadi :

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\Delta x_A}{k_A A} + \frac{\Delta x_B}{k_B A} + \frac{\Delta x_C}{k_C A}} \quad (2.18)$$

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 harga q untuk masing-masing bidang maupun untuk seluruh bidang sama,

$$q = q_A = q_B = q_C \quad (2.19)$$

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_{th}} = \frac{\Delta T_A}{R_A} = \frac{\Delta T_B}{R_B} = \frac{\Delta T_C}{R_C} \quad (2.20)$$

dimana masing-masing harga q bahan adalah :

$$q_A = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x_A}{k_A A}} \quad (2.21)$$

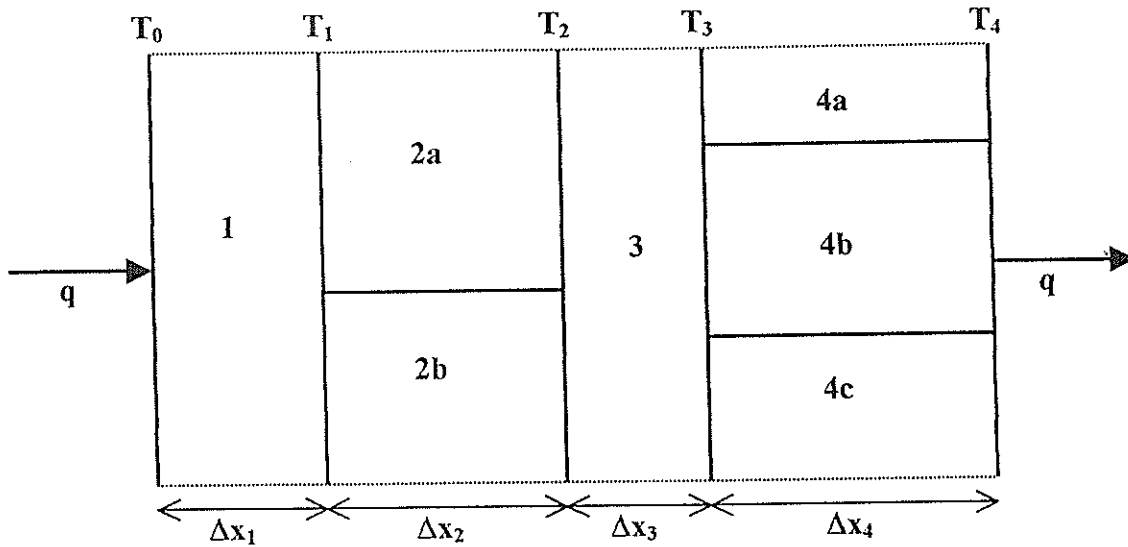
$$q_B = \frac{T_2 - T_3}{\frac{\Delta x_B}{k_B A}} \quad (2.22)$$

$$q_C = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\Delta x_C}{k_C A}} \quad (2.23)$$

Contoh perpindahan panas pada bahan yang disusun secara seri pada industri adalah pada konstruksi furnace, boiler, dan lain lain.

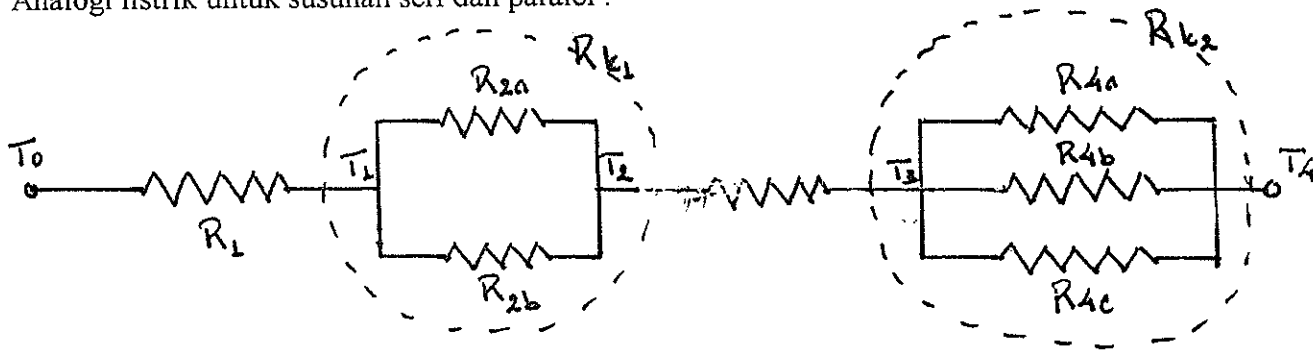
2.2.3. Perpindahan Panas Konduksi Melalui Bahan yang Disusun Seri dan Paralel

Dinding yang terdiri atas beberapa macam bahan dihubungkan secara seri dan paralel dialiri panas seperti terlihat pada gambar 2.3. Masing-masing bidang terbuat dari bahan yang berbeda sehingga harga konduktivitas panasnya juga berbeda. Perpindahan panas konduksi dianggap berlangsung hanya satu arah (arah x) sehingga perpindahan panas tegak lurus pada lapisan kedua dan keempat diabaikan.



Gambar 2.3. Perpindahan panas melalui dinding yang disusun seri dan paralel

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 bahan yang disusun secara paralel, jumlah tahanan termal dapat dituliskan:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (2.24)$$

Sehingga persamaan aliran panas untuk bidang yang disusun seri dan paralel adalah :

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_{th}} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_{k1} + R_3 + R_{k2}} \quad (2.25)$$

dimana harga masing-masing tahanan termalnya adalah :

$$R_1 = \frac{\Delta x_1}{k_1 A_1} \quad (2.26)$$

$$R_{k1} = \frac{\Delta x_2}{k_{2a} A_{2a} + k_{2b} A_{2b}} \quad (2.27)$$

$$R_3 = \frac{\Delta x_3}{k_3 A_3} \quad (2.28)$$

$$R_{k2} = \frac{\Delta x_4}{k_{4a} A_{4a} + k_{4b} A_{4b} + k_{4c} A_{4c}} \quad (2.29)$$

Penyelesaian persamaan aliran panas untuk susunan seri dan paralel adalah :

$$q = \frac{T_0 - T_4}{\frac{\Delta x_1}{k_1 A_1} + \frac{\Delta x_2}{k_{2a} A_{2a} + k_{2b} A_{2b}} + \frac{\Delta x_3}{k_3 A_3} + \frac{\Delta x_4}{k_{4a} A_{4a} + k_{4b} A_{4b} + k_{4c} A_{4c}}} \quad (2.30)$$

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 harga q untuk masing-masing bidang maupun untuk seluruh bidang sama,

$$q = q_1 = q_2 = q_3 = q_4 \quad (2.31)$$

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_{th}} = \frac{\Delta T_1}{R_1} = \frac{\Delta T_2}{R_{k1}} = \frac{\Delta T_3}{R_3} = \frac{\Delta T_4}{R_{k2}} \quad (2.32)$$

dimana masing-masing harga q bahan adalah :

$$q_1 = \frac{T_0 - T_1}{\frac{\Delta x_1}{k_1 A_1}} \quad (2.33)$$

$$q_2 = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x_2}{k_{2a} A_{2a} + k_{2b} A_{2b}}} \quad (2.34)$$

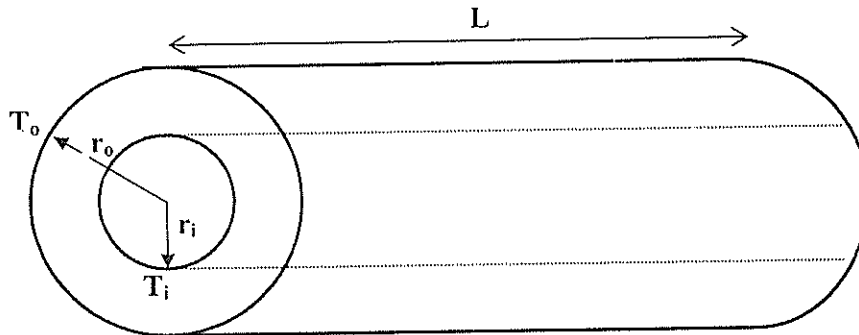
$$q_3 = \frac{T_2 - T_3}{\frac{\Delta x_3}{k_3 A_3}} \quad (2.35)$$

$$q_4 = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\Delta x_4}{k_{4a} A_{4a} + k_{4b} A_{4b} + k_{4c} A_{4c}}} \quad (2.36)$$

2.3. PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI PADA SILINDER

2.3.1. 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 seperti diperlihatkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Aliran panas satu dimensi melalui silinder berongga

Untuk silinder yang panjangnya sangat besar dibandingkan dengan diameternya, dapat kita andaikan bahwa aliran panas berlangsung menurut arah radial, sehingga koordinat ruang yang kita perlukan untuk menentukan sistem itu hanyalah r .

Luas bidang aliran panas dalam sistem silinder ini adalah :

$$A_r = 2\pi rL \quad (2.37)$$

Sehingga hukum Fourier menjadi :

$$q_r = kA_r \left(-\frac{dT}{dr} \right) = -k2\pi rL \frac{dT}{dr} \quad (2.38)$$

Kondisi batas (Boundary Condition, BC) :

$$(i) \quad r = r_i \quad \text{pada} \quad T = T_i$$

$$(ii) \quad r = r_o \quad \text{pada} \quad T = T_o$$

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

$$q = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{\ln(r_o/r_i)} \quad (2.39)$$

$$\text{atau} \quad q = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{2,3 \log(r_o/r_i)} \quad (2.40)$$

Jika D adalah diameter silinder maka :

$$\frac{r_o}{r_i} = \frac{D_o}{D_i} \quad (2.41)$$

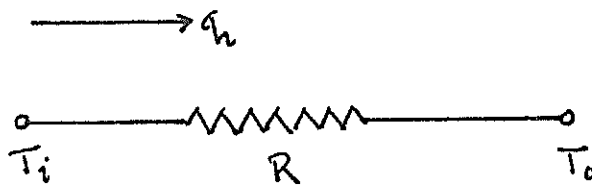
Maka persamaan aliran panas dapat ditulis,

$$q = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{\ln(D_o/D_i)} \quad (2.42)$$

atau

$$q = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{2,3 \log(D_o/D_i)} \quad (2.43)$$

Analogi listrik untuk aliran panas di atas adalah :



Bila aliran panas dinyatakan dengan analogi listrik persamaan menjadi :

$$q = \frac{\Delta T}{R_{th}} = \frac{T_i - T_o}{\frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kL}} \quad (2.44)$$

Dalam hal ini tahanan termalnya adalah :

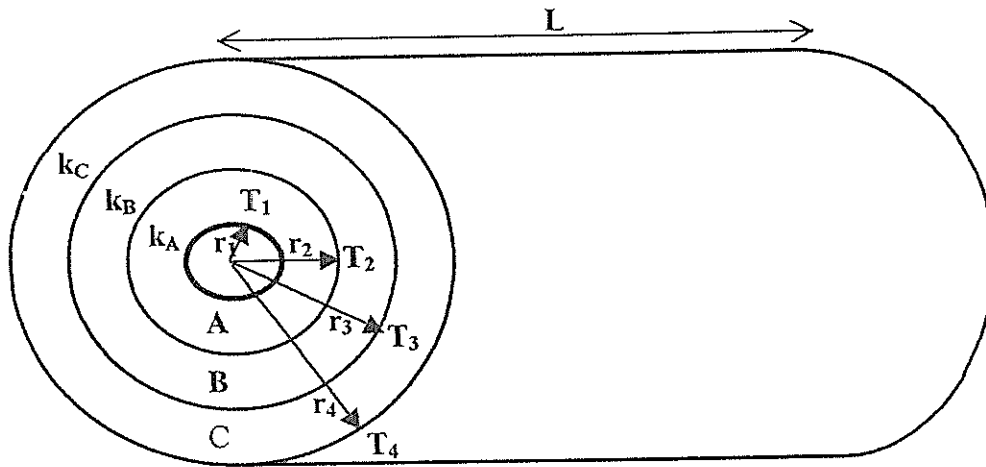
$$R_{th} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} \quad (2.45)$$

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

$$q = \frac{T_i - T_o}{\frac{(D_o - D_i)/2}{\pi kL(D_i + D_o)/2}} \quad (2.46)$$

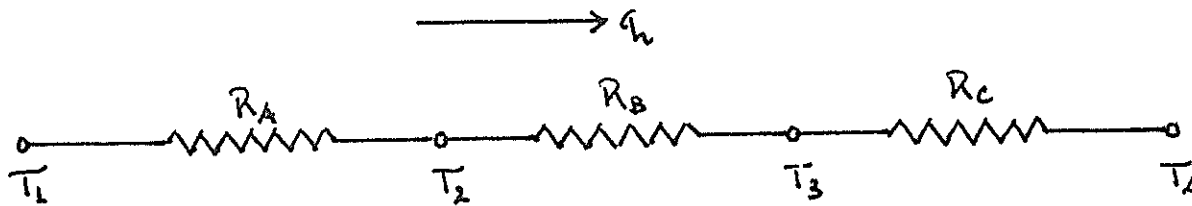
2.3.2. Perpindahan Panas Konduksi pada Dinding Lapis Rangkap Berbentuk Silinder

Sebuah silinder yang suhu permukaannya relatif tinggi dapat diisolasi dengan beberapa macam bahan yang disusun seri. Pada gambar 2.5. terlihat sebuah silinder yang diisolasi dengan tiga lapis bahan isolasi yang berbeda. Perpindahan panas konduksi hanya berlangsung ke arah radial saja.



Gambar 2.5. Aliran panas satu dimensi melalui silinder berlapis

Analogi listrik untuk aliran panas di atas adalah :



Persamaan aliran panas untuk dinding lapis rangkap berbentuk silinder adalah :

$$q = \frac{\Delta T_{\text{menyeluruh}}}{\sum R_{\text{th}}} = \frac{\Delta T}{R_A + R_B + R_C} \quad (2.47)$$

dimana harga masing-masing tahanan termalnya adalah :

$$R_A = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L} \quad (2.48)$$

$$R_B = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L} \quad (2.49)$$

$$R_C = \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L} \quad (2.50)$$

sehingga persamaan perpindahan panas konduksi untuk silinder rangkap adalah,

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L}} \quad (2.51)$$

atau

$$q = \frac{2\pi L(T_1 - T_4)}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{k_A} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_B} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{k_C}} \quad (2.52)$$

Karena perpindahan panas pada kondisi steady state, maka panas yang mengalir pada tiap bahan sama dengan perpindahan panas melalui tiga lapisan bahan.

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

sehingga,

$$q = q_A = q_B = q_C \quad (2.53)$$

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_{th}} = \frac{\Delta T_A}{R_A} = \frac{\Delta T_B}{R_B} = \frac{\Delta T_C}{R_C} \quad (2.54)$$

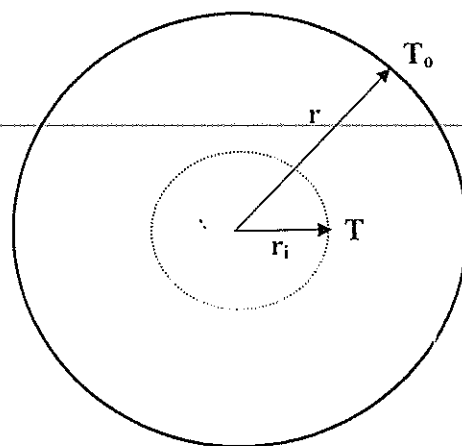
dengan harga laju perpindahan panas masing-masingnya adalah :

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\sum R_{th}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L}} \quad (2.55)$$

2.4. PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI PADA BOLA

2.4.1. 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 . Gambar 2.6. menunjukkan gambaran perpindahan panas pada bola berongga. Daya hantar panas bola berongga dianggap tetap dan dalam keadaan steady state tidak ada panas yang dibangkitkan di dalam benda serta aliran panas hanya berlangsung ke arah radial (arah r) saja.



Gambar 2.6. Aliran panas satu dimensi melalui bola berongga

Luas bidang aliran panas dalam sistem bola ini adalah :

$$A_r = 4\pi r^2 \quad (2.56)$$

Sehingga hukum Fourier menjadi :

$$q = kA_r \left(-\frac{dT}{dr} \right) = -k4\pi r^2 \frac{dT}{dr} \quad (2.57)$$

Kondisi batas (Boundary Condition, BC) untuk sistem ini adalah :

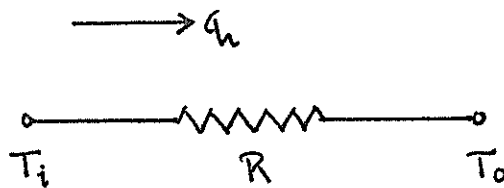
(i) $r = r_i$ pada $T = T_i$

(ii) $r = r_o$ pada $T = T_o$

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

$$q = \frac{4\pi k(T_i - T_o)}{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_o}} \quad (2.58)$$

Analogi listrik untuk kondisi di atas adalah :



Bila aliran panas dinyatakan dengan analogi listrik persamaan menjadi :

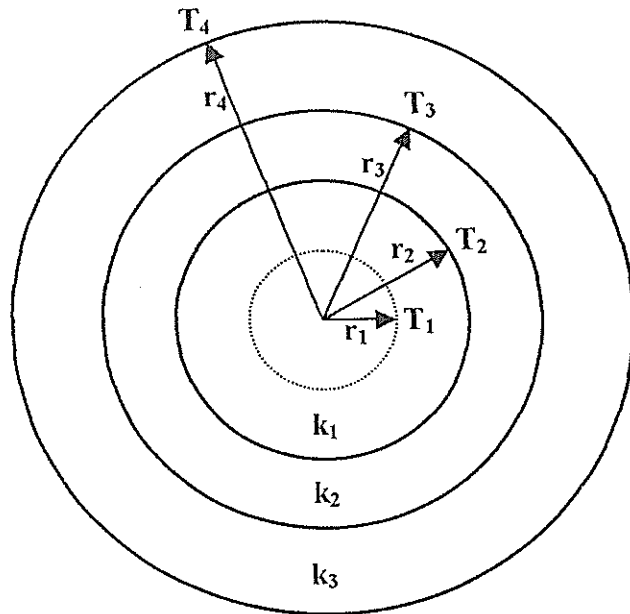
$$q = \frac{\Delta T}{R_{th}} = \frac{T_i - T_o}{\frac{1/r_i - 1/r_o}{4\pi k}} \quad (2.59)$$

Dalam hal ini tahanan termalnya adalah :

$$R_{th} = \frac{1/r_i - 1/r_o}{4\pi k} = \frac{r_o - r_i}{4\pi k r_i r_o} \quad (2.60)$$

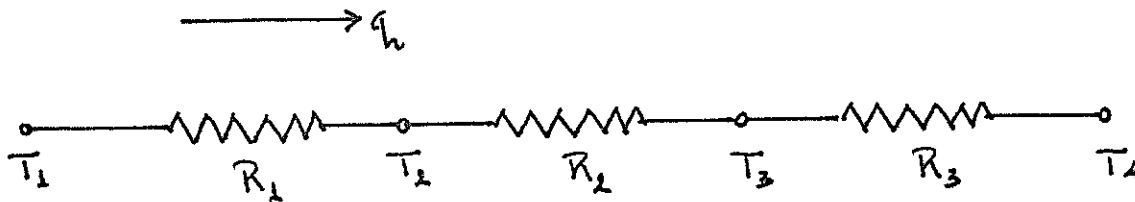
2.4.2. Perpindahan Panas Konduksi pada Dinding Lapis Rangkap Berbentuk Bola

Sebuah silinder yang suhu permukaannya relatif tinggi dapat diisolasi dengan beberapa macam bahan yang disusun seri. Pada gambar 2.7. terlihat sebuah bola yang diisolasi dengan tiga lapis bahan isolasi yang berbeda. Perpindahan panas konduksi hanya berlangsung ke arah radial saja.



Gambar 2.7. Aliran panas satu dimensi melalui bola berlapis

Analogi listrik untuk aliran panas di atas adalah :



Persamaan aliran panas untuk dinding lapis rangkap berbentuk bola adalah :

$$q = \frac{\Delta T_{\text{menyeluruh}}}{\sum R_{\text{th}}} = \frac{\Delta T}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2.61)$$

sehingga jika tahanan termalnya dijabarkan, persamaan aliran panasnya menjadi,

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{1/r_1 - 1/r_2}{4\pi k_1} + \frac{1/r_2 - 1/r_3}{4\pi k_2} + \frac{1/r_3 - 1/r_4}{4\pi k_3}} \quad (2.62)$$

atau

$$q = \frac{4\pi(T_1 - T_4)}{\frac{1/r_1 - 1/r_2}{k_1} + \frac{1/r_2 - 1/r_3}{k_2} + \frac{1/r_3 - 1/r_4}{k_3}} \quad (2.63)$$

Karena perpindahan panas pada kondisi steady state, maka panas yang mengalir pada tiap bahan sama dengan perpindahan panas melalui tiga lapisan bahan.

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

sehingga,

$$q = q_1 = q_2 = q_3 \quad (2.64)$$

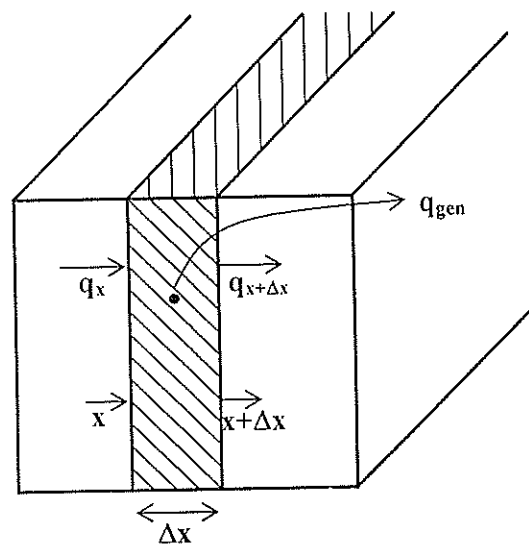
$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_{th}} = \frac{\Delta T_1}{R_1} = \frac{\Delta T_2}{R_2} = \frac{\Delta T_3}{R_3} \quad (2.65)$$

dengan harga laju perpindahan panas masing-masingnya adalah :

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\sum R_{th}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1/r_1 - 1/r_2}{4\pi k_1}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{1/r_2 - 1/r_3}{4\pi k_2}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{1/r_3 - 1/r_4}{4\pi k_3}} \quad (2.66)$$

2.5. PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI KOORDINAT SATU/DUA/TIGA DIMENSI

2.5.1. Koordinat Cartesian (x, y, z)



Gambar 2.8. Volume unsur untuk analisis konduksi-panas satu-dimensi

Kita tinjau suatu sistem satu dimensi dalam koordinat Cartesian ke arah x seperti terlihat pada gambar 2.8. Jika ditinjau suatu elemen volume dV yang tebalnya dx dengan suhu zat padat itu berubah menurut waktu dan terdapat sumber panas (*heat source*) di dalamnya maka kita dapat membuat neraca energi untuk bagian yang tebalnya dx .

Dari konsep neraca energi :

$$\text{Input} + \text{Generasi} = \text{Output} + \text{Akumulasi}$$

Energi yang dihantarkan di muka kiri + energi yang dibangkitkan dalam unsur itu = energi yang dihantarkan keluar unsure itu melalui muka kanan + perubahan energi dalam atau dakhil (*internal energy*)

$$\text{Input (Energi yang masuk)} = q_{in} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x$$

$$\text{Generasi (Energi yang dibangkitkan)} = q_{gen} = \dot{q} A \Delta x$$

$$\text{Output (Energi yang keluar)} = q_{out} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x + \Delta x}$$

$$\text{Akumulasi (Perubahan energi dalam)} = q_E = \rho C_p A \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x$$

dimana: \dot{q} = energi yang dibangkitkan, W/m³
 C_p = kapasitas panas bahan, J/kg.°C
 ρ = densitas bahan, kg/m³

Jika persamaan-persamaan di atas diselesaikan dengan konsep neraca energi akan diperoleh :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Untuk konduktivitas termal yang tetap

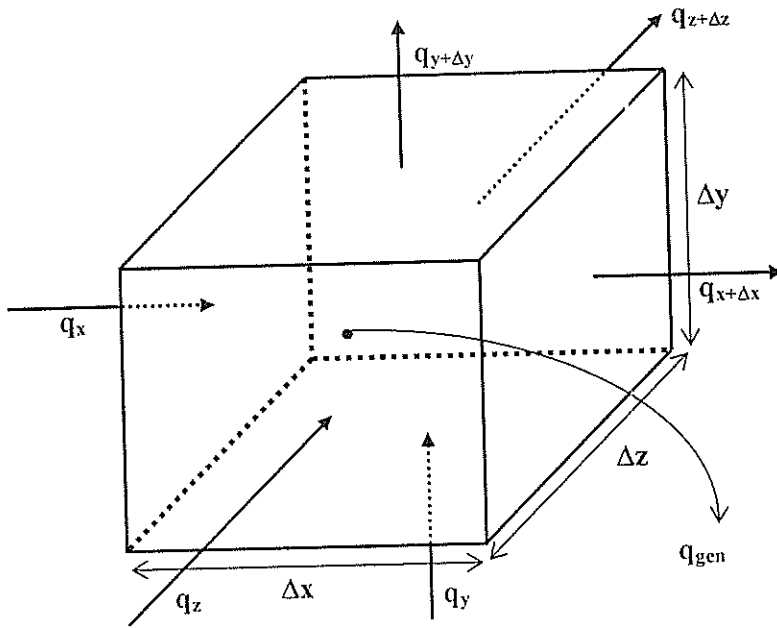
$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{\rho C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.67)$$

Persamaan di atas merupakan persamaan umum perpindahan panas konduksi satu arah dengan panas yang dibangkitkan di dalam benda dituliskan sebagai fungsi suhu. Besaran α adalah difusivitas panas (*thermal diffusivity*) dari benda yang besarnya $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ dengan satuan m²/det (ft²/jam). Makin besar harga α , makin cepat panas membaaur dalam bahan itu.

Jika neraca panas untuk perpindahan panas konduksi satu arah dikenakan pada benda dengan perpindahan panas tiga dimensi seperti terlihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9. Volume unsur untuk analisis konduksi-panas tiga-dimensi koordinat Cartesian

Ditinjau suatu elemen volume ($dV = dy dz dx$)

Dari konsep neraca energi :

$$\text{Input} + \text{Generasi} = \text{Output} + \text{Akumulasi}$$

$$q_x + q_y + q_z + q_{gen} = q_{x+\Delta x} + q_{y+\Delta y} + q_{z+\Delta z} + q_E$$

Jika persamaan di atas diselesaikan seperti pada koordinat x dengan konsep neraca energi akan diperoleh persamaan perpindahan panas tiga dimensi untuk koordinat Cartesian :

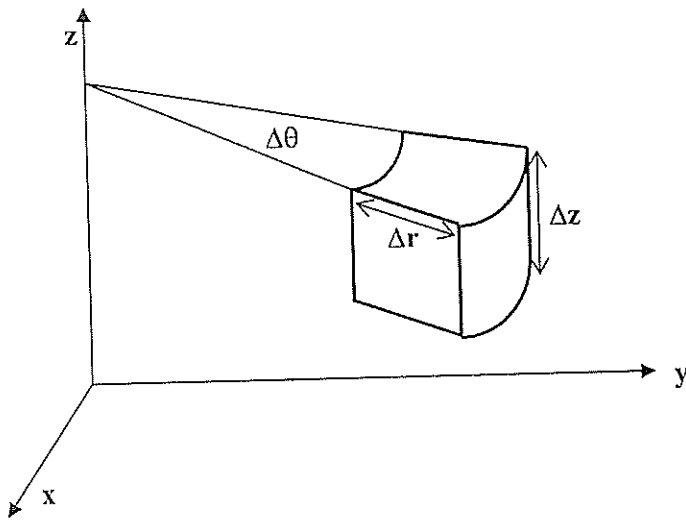
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.68)$$

Untuk konduktivitas termal yang tetap, persamaan di atas dapat dituliskan :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.69)$$

$$\text{dengan } \alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

2.5.2. Koordinat Silinder (r, z, θ)



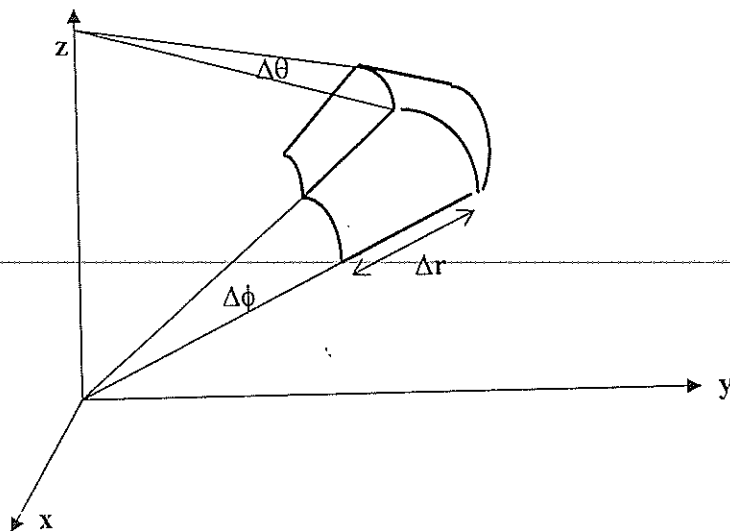
Gambar 2.10. Volume unsur untuk analisis konduksi-panas tiga-dimensi koordinat Silinder

Elemen volume pada koordinat silinder adalah (r dθ) (dr) (dz).

Persamaan perpindahan panas tiga dimensi untuk koordinat silinder adalah :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.70)$$

2.5.3. Koordinat Bola (r, θ, φ)



Gambar 2.11. Volume unsur untuk analisis konduksi-panas tiga-dimensi koordinat Bola

Ukuran elemen volume pada koordinat bola adalah : $(dr \sin\theta) (d\theta) (rd\phi)$

Persamaan perpindahan panas tiga dimensi untuk koordinat bola adalah :

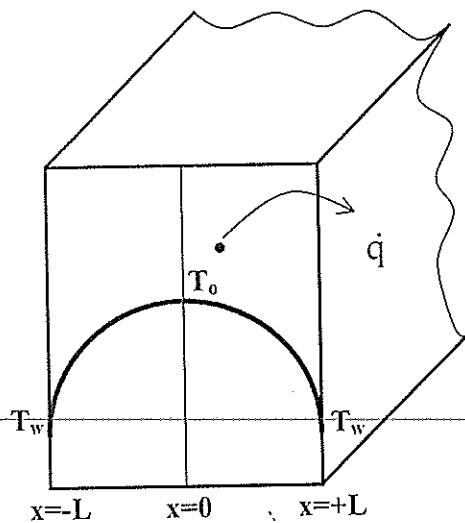
$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin\theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2\theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.71)$$

2.6. SISTEM SATU DIMENSI DENGAN SUMBER PANAS

Salah satu penerapan dari prinsip perpindahan panas adalah sistem dimana panas dibangkitkan dari dalam. Sistem reaktor nuklir, konduktor listrik, sistem reaksi kimia merupakan contoh dari penerapan prinsip ini. Pembahasan ini dibatasi pada sistem satu-dimensi atau lebih khusus lagi pada sistem dimana suhu merupakan fungsi di satu koordinat ruang saja.

2.6.1. Sumber Panas pada Bidang Datar

Suatu bidang datar dengan sumber panas yang terbagi rata seperti pada gambar 2.12. Tebal dinding ke arah x adalah $2L$ sedang dimensi di kedua arah yang lain dianggap cukup besar sehingga aliran panas dapat dianggap satu dimensi (arah x). Panas yang dibangkitkan sebesar \dot{q} dan konduktivitas termal tidak berubah terhadap suhu.



Gambar 2.12. Perpindahan panas konduksi satu-dimensi pada bidang datar dengan pembangkitan panas

Dalam hal ini :

T_w = suhu di dinding

T_0 = suhu di pusat

Persamaan aliran panas pada keadaan steady state adalah :

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (2.72)$$

Kondisi batas (BC) pada kedua muka dinding yaitu :

$$(i) T = T_o \quad \text{pada} \quad x = 0$$

$$(ii) T = T_w \quad \text{pada} \quad x = \pm L$$

Penyelesaian persamaan aliran panas dengan kondisi batas di atas akan menghasilkan persamaan distribusi suhu sepanjang arah x yaitu :

$$T - T_o = -\frac{\dot{q}}{2k} x^2 \quad (2.73)$$

Suhu bidang tengah (T_o) atau suhu maksimal dapat diperoleh dengan mensubstitusi $T = T_w$ pada $x = L$ ke dalam persamaan di atas. Sehingga suhu bidang tengah (suhu maksimal) adalah :

$$T_o = \frac{\dot{q} L^2}{2k} + T_w \quad (2.74)$$

Suhu di dinding adalah

$$T_w - T_o = -\frac{\dot{q} L^2}{2k} \quad (2.75)$$

Distribusi suhu dapat pula dihitung dengan

$$\frac{T - T_o}{T_w - T_o} = \left(\frac{x}{L}\right)^2 \quad (2.76)$$

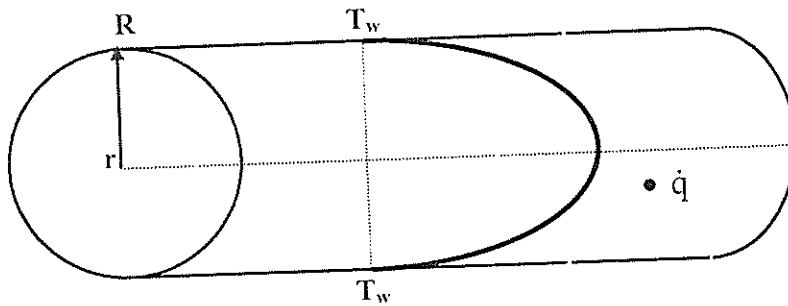
atau

$$\frac{T - T_w}{T_o - T_w} = 1 - \frac{x^2}{L^2} \quad (2.77)$$

2.6.2. Sumber Panas pada Silinder

2.6.2.1. Silinder Pejal

Suatu silinder pejal dengan jari-jari R dengan sumber panas terbagi rata dan konduktivitas termal tetap seperti terlihat pada gambar 2.13. Silinder cukup panjang ($L/D \gg \gg$) sehingga suhu hanya merupakan fungsi jari-jari saja.



Gambar 2.13. Perpindahan panas konduksi satu-dimensi pada silinder pejal dengan pembangkitan panas

Persamaan aliran panas pada keadaan steady state adalah :

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (2.78)$$

Kondisi batas (BC) untuk kondisi ini adalah :

$$(i) \frac{dT}{dr} = 0 \quad \text{pada} \quad r = 0$$

$$(ii) T = T_w \quad \text{pada} \quad r = R$$

Penyelesaian persamaan aliran panas dengan kondisi batas di atas akan menghasilkan persamaan distribusi suhu sepanjang arah radial yaitu :

$$T = T_w + \frac{\dot{q}}{4k} (R^2 - r^2) \quad (2.79)$$

Suhu maksimal tercapai pada pusat silinder pada saat $r = 0$.

$$T_o = T_w + \frac{\dot{q} R^2}{4k} \quad (2.80)$$

Distribusi suhu dapat pula dihitung dengan

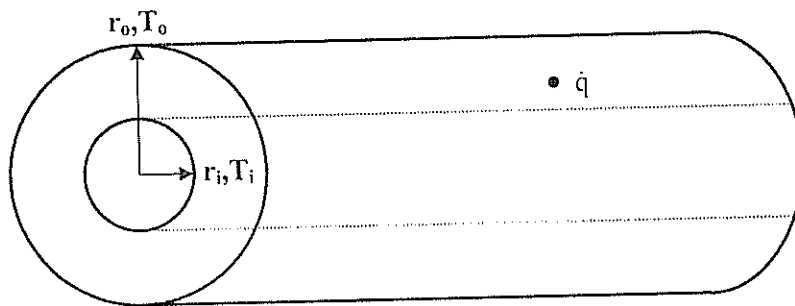
$$\frac{T - T_w}{T_o - T_w} = 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (2.81)$$

Contoh pembangkitan panas di dalam silinder terjadi pada bahan radio aktif yang berbentuk silinder atau pada arus listrik yang mengalir melalui kawat wolfram dalam lampu pijar. Arus listrik yang mengalir melalui kawat wolfram memanaskan kawat itu dan panas akan diteruskan dari kawat ke sekelilingnya secara radiasi.

2.6.2.2. Silinder Berongga

Dengan cara yang sama dapat dijabarkan persamaan distribusi suhu pada silinder berongga jika ada panas dakhil yang dibangkitkan di dalam benda. Suatu silinder berongga

dengan jari-jari dalam r_i dan jari-jari luar r_o , panas dibangkitkan serba sama persatuan volume dan konduktivitas termal tetap.



Gambar 2.14. Perpindahan panas konduksi satu-dimensi pada silinder berongga dengan pembangkitan panas

Persamaan aliran panas (keadaan steady state)

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (2.82)$$

Kondisi batas (BC) :

- (i) $T = T_i$ pada $r = r_i$
- (ii) $T = T_o$ pada $r = r_o$

Penyelesaian persamaan aliran panas dengan kondisi batas di atas akan menghasilkan persamaan distribusi suhu sepanjang arah radial yaitu :

$$T = T_i + \frac{\dot{q}}{4k} (r_i^2 - r^2) + \frac{\left[T_o - T_i - \frac{\dot{q}}{4k} (r_i^2 - r_o^2) \right] \ln(r/r_i)}{\ln(r_o/r_i)} \quad (2.83)$$

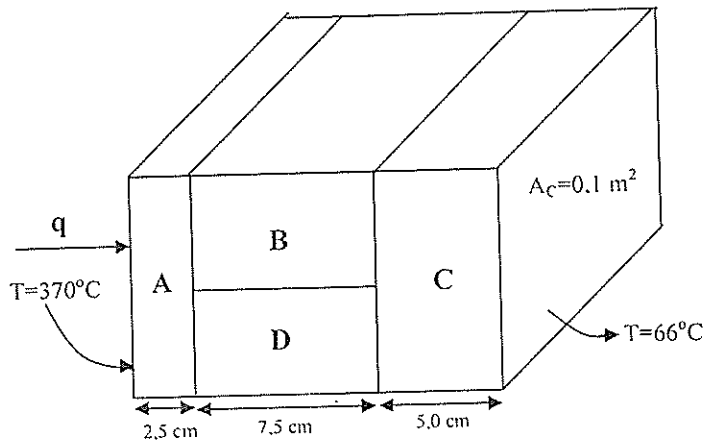
atau

$$T = T_o + \frac{\dot{q}}{4k} (r_o^2 - r^2) + \frac{\left[T_i - T_o + \frac{\dot{q}}{4k} (r_i^2 - r_o^2) \right] \ln(r/r_o)}{\ln(r_i/r_o)} \quad (2.84)$$

Contoh pembangkitan panas di dalam silinder berongga adalah pada pipa yang di dalamnya dialirkan fluida. Pipa dialiri listrik sehingga suhu dinding pipa naik, selanjutnya dinding pipa memanasi fluida.

TUGAS / LATIHAN

1.



$$\begin{aligned} k_A &= 150 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C} \\ k_B &= 30 \\ k_C &= 50 \\ k_D &= 70 \\ A_B &= A_D \end{aligned}$$

- a. Hitunglah perpindahan kalor per satuan luas melalui dinding komposit tersebut !
 - b. Hitung suhu antarmuka lapisan dinding !
2. Sebuah dinding datar terbuat dari bahan yang konduktivitas thermalnya berubah menurut persamaan $k = a + bT + cT^2$. Turunkan persamaan untuk perpindahan kalor pada dinding tersebut !
 3. Suatu bahan yang mempunyai tebal 2,5 cm dan luas penampang 0,1 m², mempunyai suhu pada satu sisi 95°C dan sisi lain 35°C. Hitunglah suhu di tengah-tengah bahan tersebut !
 4. Dinding furnace dilapisi oleh 3 lapisan : firebrick dengan ketebalan 6 in ($k=0.95$ Btu/h.ft.°F), insulating brick ($k=0.4$ Btu/h.ft.°F) dan common brick ($k=0.8$ Btu/h.ft.°F). Suhu masuk firebrick, $T_1 = 1800^\circ\text{F}$, suhu maksimum insulating brick, $T_2 = 1720^\circ\text{F}$ dan suhu $T_3 = 280^\circ\text{F}$.
 - a. Hitunglah ketebalan lapisan insulating brick !
 - b. Jika common brick tebalnya 9 in, hitunglah suhu keluar !
 5. Suatu bahan tertentu mempunyai tebal 30 cm dan konduktivitas thermalnya adalah 0,04 W/m.°C. Pada saat tertentu distribusi suhu terhadap x , yaitu jarak dari muka kiri adalah $T=150x^2 - 30x$, dimana x dalam meter. Hitunglah :
 - a. Laju aliran kalor pada $x = 0$ dan pada $x = 30$ cm.
 - b. Apa yang dapat anda simpulkan dari hasil tersebut ?
-
6. Sebuah dinding datar terbuat dari bahan yang konduktivitas thermalnya berubah menurut persamaan $k = k_0 (1 + \beta T^2)$. Turunkan persamaan untuk perpindahan kalor pada dinding tersebut !
 7. 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 $k = 0,5$ W/m.°C setebal 9 cm, diikuti dengan lapisan lain dengan $k = 0,25$ W/m.°C setebal 4 cm. Suhu luar isolasi adalah 20°C. Hitunglah kehilangan kalor per satuan panjang andaikan $k = 47$ W/m.°C untuk pipa !

8. 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 !

BAB III

PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI DAN KONVEKSI SECARA SIMULTAN

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

Koefisien perpindahan panas menyeluruh adalah merupakan aliran panas menyeluruh sebagai hasil gabungan proses konduksi dan konveksi. Koefisien perpindahan panas menyeluruh dinyatakan dengan U dengan satuan $W/m^2 \cdot K$ ($Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ R$).

Perpindahan panas konveksi dapat dihitung dari :

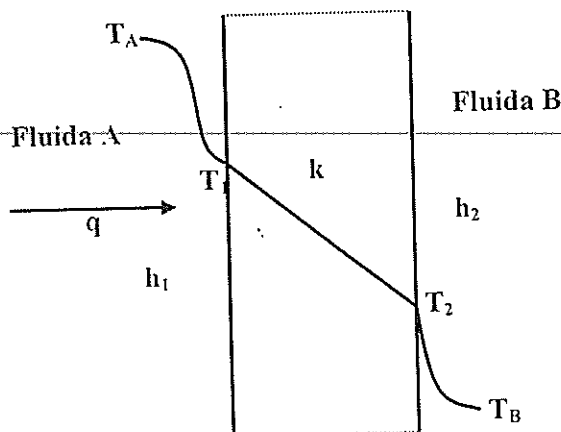
$$q_{konv} = hA(T_w - T_s) \quad (3.1)$$

Analogi tahanan listrik dapat dibuat untuk proses konveksi dengan menuliskan persamaan di atas sebagai berikut :

$$q_{konv} = \frac{T_w - T_s}{1/hA} \quad (3.2)$$

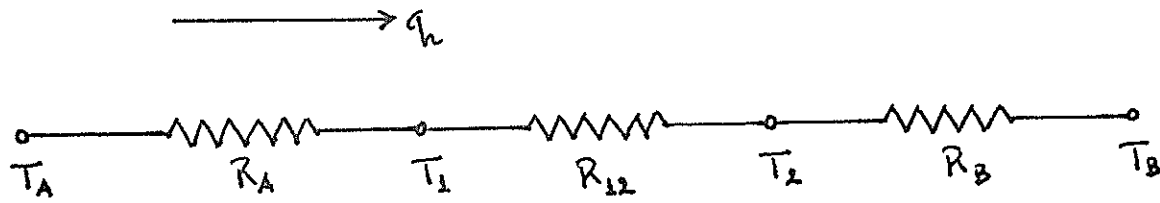
3.1.1. KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS MENYELURUH PADA BIDANG DATAR

Suatu bidang datar, salah satu sisinya terdapat fluida panas A dan sisi lainnya terdapat fluida B yang lebih dingin. Aliran perpindahan panasnya dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3.1. Perpindahan panas menyeluruh melalui dinding datar

Analogi listrik untuk proses perpindahan panas di atas dapat digambarkan dengan jaringan tahanan



Perpindahan panas menyeluruh dinyatakan dengan membagi beda suhu menyeluruh dengan jumlah tahanan termal :

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{kA} + \frac{1}{h_2 A}} = \frac{A(T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (3.3)$$

atau
$$q = UA \Delta T_{\text{menyeluruh}} \quad (3.4)$$

dimana A adalah luas bidang aliran panas. Sehingga koefisien perpindahan panas menyeluruh dapat dinyatakan dengan :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (3.5)$$

Jika perpindahan panas mengalir melalui tahanan konveksi zat alir dengan koefisien h_1 , tahanan konduksi bahan A, B dan C pada suatu bidang datar yang disusun seri dengan tebal x_A , x_B dan x_C dan tahanan konveksi zat alir dengan koefisien konveksi h_2 , perpindahan panasnya dapat dituliskan :

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \sum \left(\frac{\Delta x}{kA} \right) + \frac{1}{h_2 A}} = \frac{A(T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1} + \sum \left(\frac{\Delta x}{k} \right) + \frac{1}{h_2}} \quad (3.6)$$

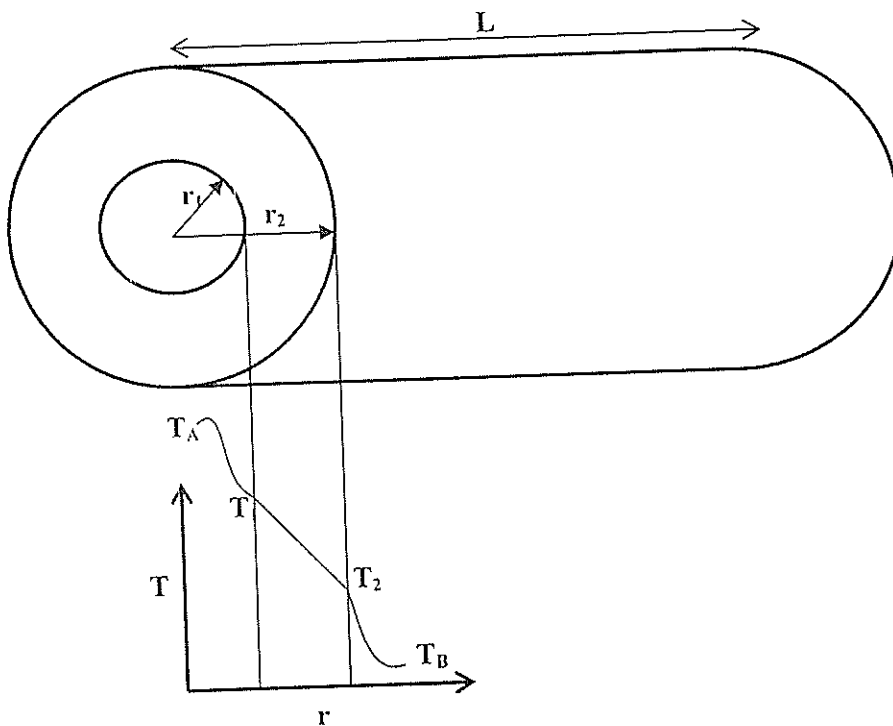
sehingga koefisien perpindahan panas menyeluruh dapat dinyatakan dengan :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum \left(\frac{\Delta x}{k} \right) + \frac{1}{h_2}} \quad (3.7)$$

$$U = \frac{1}{A(R_{C_1} + \sum R_k + R_{C_2})} \quad (3.8)$$

3.1.2. KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS MENYELURUH PADA SILINDER

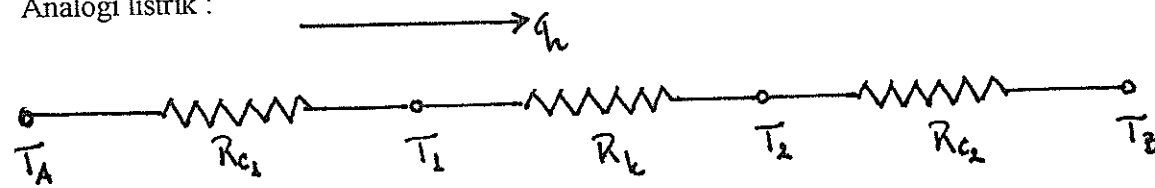
Suatu silinder berongga terkena lingkungan konveksi di permukaan bagian dalam dan permukaan bagian luar oleh fluida A dan fluida B seperti terlihat pada gambar 3.2. Suhu kedua fluida adalah T_A dan T_B . Zat alir mengalir melalui pipa pada suhu T_A . Perpindahan panas dari zat alir ke pipa secara konveksi diteruskan lewat pipa secara konduksi dan selanjutnya ke zat alir yang ada di luar pipa pada suhu T_B secara konveksi. Perpindahan panas konduksi dan konveksi berlangsung bersama-sama. Sebagai contoh adalah perpindahan panas pada pipa uap yang diisolasi dan freon dingin mengalir di dalam pipa.



Gambar 3.2. Perpindahan panas menyeluruh melalui silinder berongga

Dalam hal ini luas bidang konveksi tidak sama untuk kedua fluida. Luas bidang ini bergantung dari diameter dalam tabung dan tebal dinding.

Analogi listrik :



Dalam hal ini perpindahan panas menyeluruh dari zat alir di dalam pipa ke zat alir di luar pipa berdasarkan beda suhu antara kedua zat alir adalah

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_2 A_2}} \quad (3.9)$$

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,

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_2 2\pi r_2 L}} = \frac{2\pi L (T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1 r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_2 r_2}} \quad (3.10)$$

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

$$U_1 A_1 = U_2 A_2 \quad (3.11)$$

Bidang dalam,

$$q = \frac{A_1 (T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1} + \frac{A_1 \ln(r_2/r_1)}{2\pi k L} + \frac{A_1}{h_2 A_2}} = \frac{2\pi r_1 L (T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{r_1}{h_2 r_2}} \quad (3.12)$$

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{r_1}{h_2 r_2}} \quad (3.13)$$

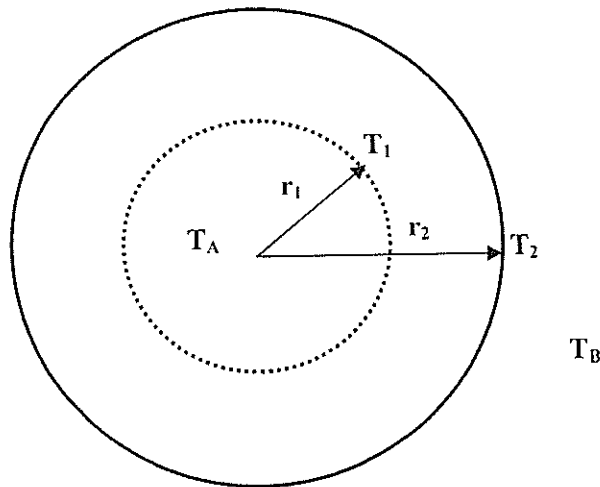
Bidang luar,

$$q = \frac{A_2 (T_A - T_B)}{\frac{A_2}{h_1 A_1} + \frac{A_2 \ln(r_2/r_1)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_2}} = \frac{2\pi r_2 L (T_A - T_B)}{\frac{r_2}{h_1 r_1} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (3.14)$$

$$U_2 = \frac{l}{\frac{r_2}{h_1 r_1} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{l}{h_2}} \quad (3.15)$$

Nilai U tidak dipengaruhi oleh panjang pipa.

3.1.3. KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS MENYELURUH PADA BOLA



Gambar 3.3. Perpindahan panas menyeluruh melalui bola berongga

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

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{1/r_1 - 1/r_2}{4\pi k} + \frac{1}{h_2 A_2}} \quad (3.16)$$

Koefisien perpindahan panas menyeluruh,

- Bidang dalam,

$$q = \frac{A_1 (T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1} + \frac{A_1 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}{4\pi k} + \frac{A_1}{h_2 A_2}} = \frac{4\pi r_1^2 (T_A - T_B)}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}{k} + \frac{r_1^2}{h_2 r_2^2}} \quad (3.17)$$

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}{k} + \frac{r_1^2}{h_2 r_2^2}} \quad (3.18)$$

- Bidang luar,

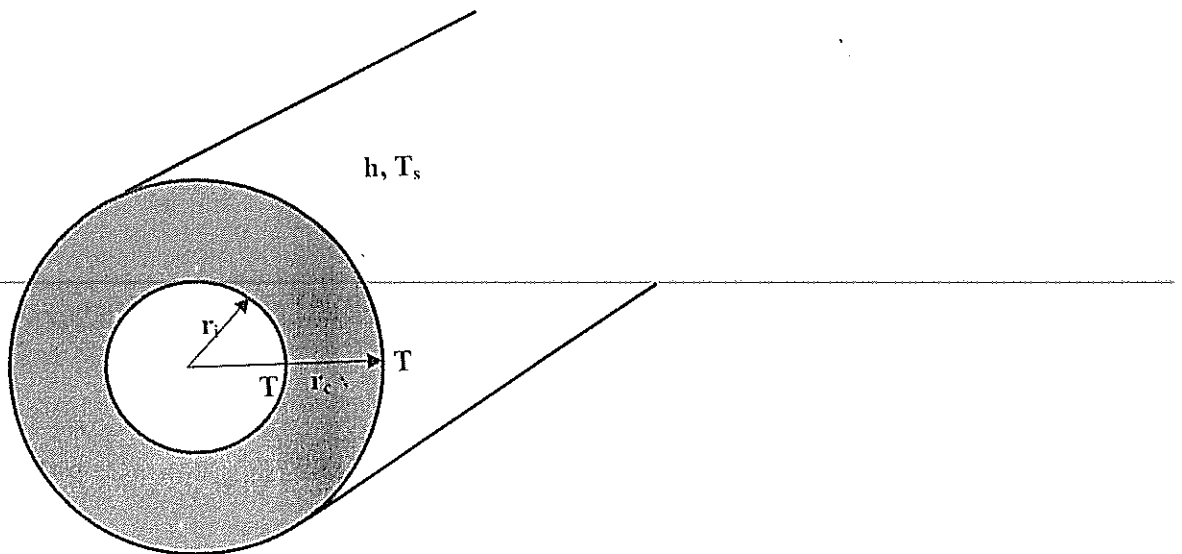
$$q = \frac{A_2 (T_A - T_B)}{\frac{A_2}{h_1 A_1} + \frac{A_2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}{4\pi k} + \frac{1}{h_2}} = \frac{4\pi r_2^2 (T_A - T_B)}{\frac{r_2^2}{h_1 r_1^2} + \frac{r_2^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (3.19)$$

$$U_2 = \frac{1}{\frac{r_2^2}{h_1 r_1^2} + \frac{r_2^2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (3.20)$$

3.2. TEBAL ISOLASI KRITIS

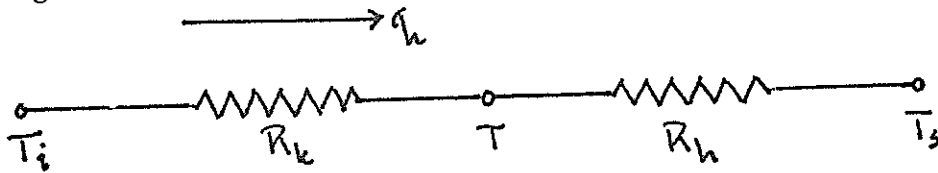
3.2.1. SILINDER TERISOLASI

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



Gambar 3.4. Perpindahan panas menyeluruh melalui pipa terisolasi

Analogi listrik untuk pipa terisolasi adalah



Dalam hal ini tahanan termalnya adalah :

$$R_k = \frac{\ln(r_c/r_i)}{2\pi kL} \quad ; \quad R_h = \frac{1}{2\pi r_c L h}$$

Persamaan perpindahan panas untuk pipa terisolasi adalah :

$$q = \frac{\Delta T_{\text{menyeluruh}}}{\sum R_{th}} = \frac{T_i - T_s}{\frac{\ln(r_c/r_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{2\pi r_c L h}} \quad (3.21)$$

$$q = \frac{2\pi L(T_i - T_s)}{\frac{\ln(r_c/r_i)}{k} + \frac{1}{r_c h}} \quad (3.22)$$

Pada permukaan datar, makin tebal isolasi, tahanan isolasi makin besar, sehingga panas yang hilang dari permukaan datar makin kecil. Tetapi pada permukaan silinder, penambahan tebal isolasi dapat berakibat memperbesar panas yang hilang, sebab makin tebal lapisan isolasi, luas permukaan untuk perpindahan panas menjadi semakin besar pula. Untuk itu maka perlu dicari tebal isolasi kritis yaitu tebal isolasi yang memberikan perpindahan panas maksimal.

Perpindahan panas maksimum dapat dicari dengan menentukan jari-jari kritis isolasi (r_c) yang dapat dicari dengan 2 cara, yaitu

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

Jari-jari kritis diperoleh :

$$r_c = \frac{k}{h} \quad (3.23)$$

Dengan kata lain, perpindahan panas maksimum dari pipa terjadi ketika jari-jari kritis sama dengan ratio konduktivitas termal isolasi dengan koefisien perpindahan panas permukaan.

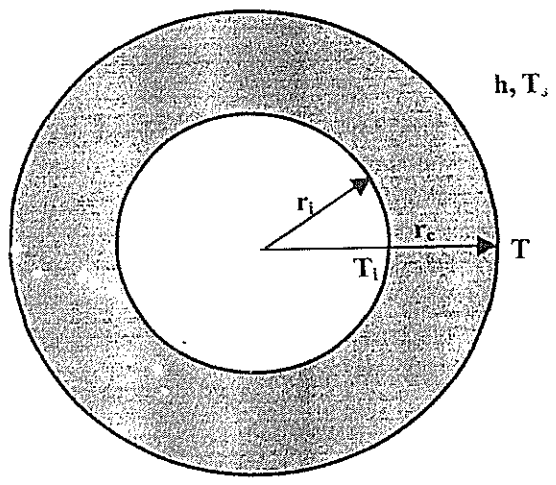
$r_c < \frac{k}{h}$ perpindahan panas meningkat dengan penambahan tebal isolasi.

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

Dua variable yang mempengaruhi perpindahan panas yaitu tebal isolasi dan luas permukaan. Jika tebal isolasi ditambah, luas permukaan makin besar berarti panas yang hilang secara konveksi juga makin besar. Tetapi bila tebal isolasi lebih besar dari (k/h) tahanan konduksi yang dominan.

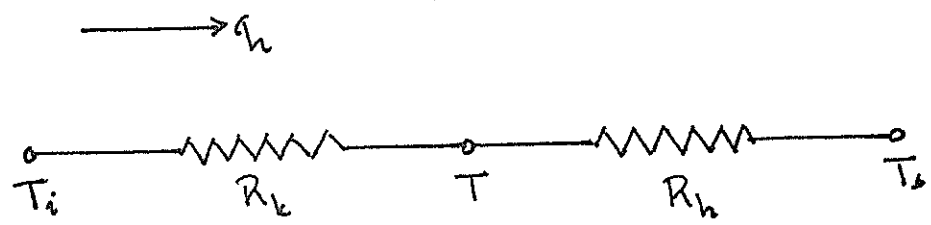
3.2.2. BOLA TERISOLASI

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



Gambar 3.5. Perpindahan panas menyeluruh melalui bola terisolasi

Analogi listrik untuk bola terisolasi adalah



Tahanan termal untuk sistem di atas adalah

$$R_k = \frac{1/r_i - 1/r_c}{4\pi k} \quad ; \quad R_h = \frac{1}{4\pi r_c^2 h}$$

Persamaan perpindahan panas untuk bola terisolasi adalah :

$$q = \frac{\Delta T_{\text{menyeluruh}}}{\sum R_{\text{th}}} = \frac{T_i - T_s}{\frac{1/r_i - 1/r_c}{4\pi k} + \frac{1}{4\pi r_c^2 h}} \quad (3.24)$$

$$q = \frac{4\pi(T_i - T_s)}{\frac{1/r_i - 1/r_c}{k} + \frac{1}{r_c^2 h}} \quad (3.25)$$

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 :

$$r_c = \frac{2k}{h} \quad (3.26)$$

TUGAS / LATIHAN

1. Dinding suatu dapur dibuat dari tiga lapisan. Lapisan I tebalnya 6 in dengan $k = 1$, lapisan II tebalnya x ft dengan $k = 0,25$ dan lapisan III tebalnya 6 in dengan $k = 0,05$ Btu/hr.ft. $^{\circ}$ F. Suhu permukaan dalam lapisan I adalah 2500° F sedang suhu permukaan luar dari lapisan III adalah 100° F.
 - a. Hitunglah tebal lapisan tengah (x) supaya suhu di tengah-tengah dinding tidak lebih dari 200° F.
 - b. Hitunglah koefisien perpindahan panas konveksi antara dinding dapur dengan udara jika diketahui suhu udara luar 60° F.
 2. Suatu dinding bangunan terdiri dari beton ($k = 1,2$ W/m. $^{\circ}$ C) setebal 6,0 in, isolasi kaca serat ($k = 0,038$ W/m. $^{\circ}$ C) setebal 2,0 in dan papan gypsum ($k = 0,05$ W/m. $^{\circ}$ C) setebal 3/8 in. Koefisien konveksi dalam dan luar masing-masing ialah 2,0 dan 7,0 Btu/h.ft 2 . $^{\circ}$ F. Suhu luar 20° F dan suhu dalam 72° F. Hitunglah :
 - a. Koefisien perpindahan kalor menyeluruh.
 - b. Nilai R.
 - c. Rugi kalor per satuan luas
 3. Sebuah bola lowong terbuat dari aluminium ($k = 202$ W/m. $^{\circ}$ 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 $k = 50$ mW/m. $^{\circ}$ C setebal 1 cm. Bagian luar isolasi ini bersentuhan dengan lingkungan yang mempunyai $h = 20$ W/m 2 . $^{\circ}$ C dan $T_s = 10^{\circ}$ C. Bagian dalam bola tetap mempunyai suhu 100° C, hitunglah perpindahan kalor dalam kondisi ini.
 4. Salah satu sisi dinding datar mempunyai suhu 100° C, sedang sisi yang sebelah lagi berada dalam lingkungan konveksi dengan $T = 10^{\circ}$ C dan $h = 10$ W/m 2 . $^{\circ}$ C. Dinding itu mempunyai $k = 1,6$ W/m. $^{\circ}$ C dan tebalnya 40 cm. Hitunglah laju perpindahan kalor melalui dinding ini !
 5. Sebuah ruang ukuran 3 x 3 x 3 m. Salah satu dindingnya dijaga pada suhu 760° C; lantainya pada **XXX** $^{\circ}$ C. Keempat permukaan lainnya diisolasi sempurna. Andaikan semua permukaan hitam, hitunglah perpindahan kalor netto antara dinding yang panas dengan lantai yang dingin.
-
6. Sebuah benda berbentuk bola berdiameter 5 cm dan bersuhu 200° C diisolasi dengan menggunakan asbes ($k = 0,17$ W/m. $^{\circ}$ C). Benda tersebut terkena udara kamar yang suhunya 20° C dengan $h = 3,0$ W/m 2 . $^{\circ}$ C.
 - a. Turunkan persamaan untuk jari-jari kritis isolasi tersebut !
 - b. Hitunglah jari-jari kritis isolasi asbes !
 - c. Hitung panas yang hilang pada jari-jari kritis !
 - d. Hitung panas yang hilang jika tanpa isolasi !
 7. Sebuah kawat dengan diameter 1,0 mm berada pada suhu 400° C dan terbuka pada lingkungan konveksi pada suhu 40° C dengan $h = 150$ W/m 2 . $^{\circ}$ C. Hitunglah konduktivitas

thermal yang akan menyebabkan isolasi setebal 0,2 mm menghasilkan jari-jari kritis. Berapa tebal isolasi kritis harus ditambahkan untuk mengurangi perpindahan kalor sebesar 75% dari yang terjadi bila kawat tidak diisolasi ?

BAB IV

PERPINDAHAN PANAS RADIASI

Modus ketiga dalam perpindahan panas adalah radiasi atau pancaran atau sinaran atau ilian termal. Radiasi termal adalah radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh suatu benda karena suhunya. Banyak proses dalam industri seperti pemanasan, pendinginan dan pengeringan berlangsung dengan perpindahan panas secara pancaran termasuk pembakaran minyak hidrokarbon dan tenaga pancaran dari matahari.

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

$$c = \lambda \nu \quad (4.1)$$

dimana : c = kecepatan cahaya

λ = panjang gelombang dalam μm atau \AA ($1 \text{\AA} = 10^{-8} \text{ cm}$)

ν = frekuensi

Radiasi termal terletak dalam rentang panjang gelombang antara kira-kira 0,1 sampai 100 μm

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

$$E = h \nu \quad (4.2)$$

dimana : 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 sehingga pada hakekatnya radiasi dapat digambarkan sebagai gas foton yang mengalir dari satu tempat ke tempat lain.

Dengan teori relativitas dan termodinamika 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 :

$$E_b = \sigma T^4 \quad (4.3)$$

dimana : E_b = daya emisi (*emissive power*) benda hitam

yaitu energi yang dipancarkan (diradiasikan) per satuan waktu per satuan luas, W/m^2

σ = konstanta Stefan-Boltzmann, $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ($0,1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h.ft}^2 \cdot \text{R}^4$)

T = suhu absolut, K

$b = \text{blackbody}$ (benda hitam)

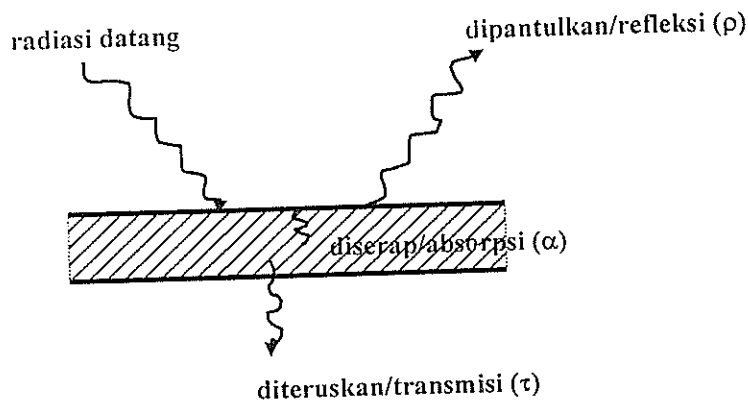
Subskrip b menunjukkan radiasi dari benda hitam. Benda hitam adalah benda yang memenuhi hukum Stefan Boltzman yang tidak dapat memantulkan atau meneruskan sinar sehingga kelihatan hitam di mata orang. Juga benda yang menyerap seluruh radiasi yang menimpanya.

Sifat-sifat benda hitam :

1. Sebuah benda hitam akan mengabsorpsi semua panas radiasi yang mengenainya, tidak membedakan panjang gelombang dan arah datangnya panas.
2. Tidak ada benda lain yang dapat memancarkan panas lebih besar dari sebuah benda hitam pada suhu yang sama.
3. Meskipun panas yang dipancarkan oleh benda hitam merupakan fungsi dari panjang gelombang dan suhu, tetapi panas dipancarkan ke segala arah, sehingga benda hitam dapat disebut juga suatu pemancar panas difus (ke segala arah).

4.1. SIFAT-SIFAT RADIASI

Jika suatu energi radiasi menimpa permukaan suatu bahan, maka sebagian dari radiasi itu dipantulkan (refleksi), sebagian diserap (absorpsi) dan sebagian lagi diteruskan (transmisi) seperti terlihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1. Sifat-sifat benda yang menerima energi radiasi

ρ = faktor refleksi (refleksivitas)

α = faktor absorpsi (absorpsivitas)

τ = faktor transmisi (transmisivitas)

Maka,

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (4.4)$$

Kebanyakan benda padat tidak meneruskan radiasi termal sehingga harga transmisivitas $\tau = 0$, 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, $\varepsilon = 1$

$$\varepsilon = \alpha = 1$$

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)

$$0 < \varepsilon < 1$$

4.2. IDENTITAS KIRCHHOFF

Daya emisi suatu benda (E) ialah energi yang dipancarkan oleh sebuah benda per satuan luas per satuan waktu.

Sedangkan emisivitas suatu benda (ε) adalah perbandingan antara energi yang dapat dipancarkan oleh benda itu pada suhu T dibandingkan dengan energi yang dipancarkan oleh benda hitam pada suhu yang sama

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (4.5)$$

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

$$\varepsilon = \alpha \quad (4.6)$$

Persamaan (4.6) di atas disebut dengan identitas Kirchhoff.

Energi yang dipancarkan oleh suatu benda selalu lebih kecil dari energi yang dipancarkan oleh benda hitam sehingga harga $\varepsilon \leq 1$. Harga ε maksimal 1 yaitu untuk benda hitam.

4.3. FAKTOR PANDANGAN

Faktor pandang (*view factor*) disebut juga faktor bentuk (*shape factor*), faktor sudut (*angle factor*), faktor konfigurasi (*configuration factor*) atau faktor geometris (*geometry factor*).

Jika dua buah permukaan hitam, permukaan 1 dan permukaan 2 saling meradiasi maka energi di permukaan 1 bisa sampai di permukaan 2 dan sebaliknya. Jika kita ingin mendapatkan suatu persamaan umum untuk pertukaran energi antara kedua permukaan itu apabila keduanya mempunyai suhu yang berlainan, maka kita gunakan factor bentuk yang dapat ditulis sebagai berikut :

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 :

$$E_{b2}A_2F_{21}$$

Karena keduanya merupakan benda hitam, maka semua energi yang mengenai kedua benda itu akan diabsorpsi sempurna sehingga pertukaran energi nettoanya adalah :

$$q_{1-2} = E_{b1}A_1F_{12} - E_{b2}A_2F_{21} \quad (4.7)$$

Jika kedua permukaan itu mempunyai suhu yang sama, maka tidak terjadi pertukaran panas, artinya $q_{1-2} = 0$, sehingga

$$E_{b1} = E_{b2}$$

sehingga

$$A_1F_{12} = A_2F_{21} \quad (4.8)$$

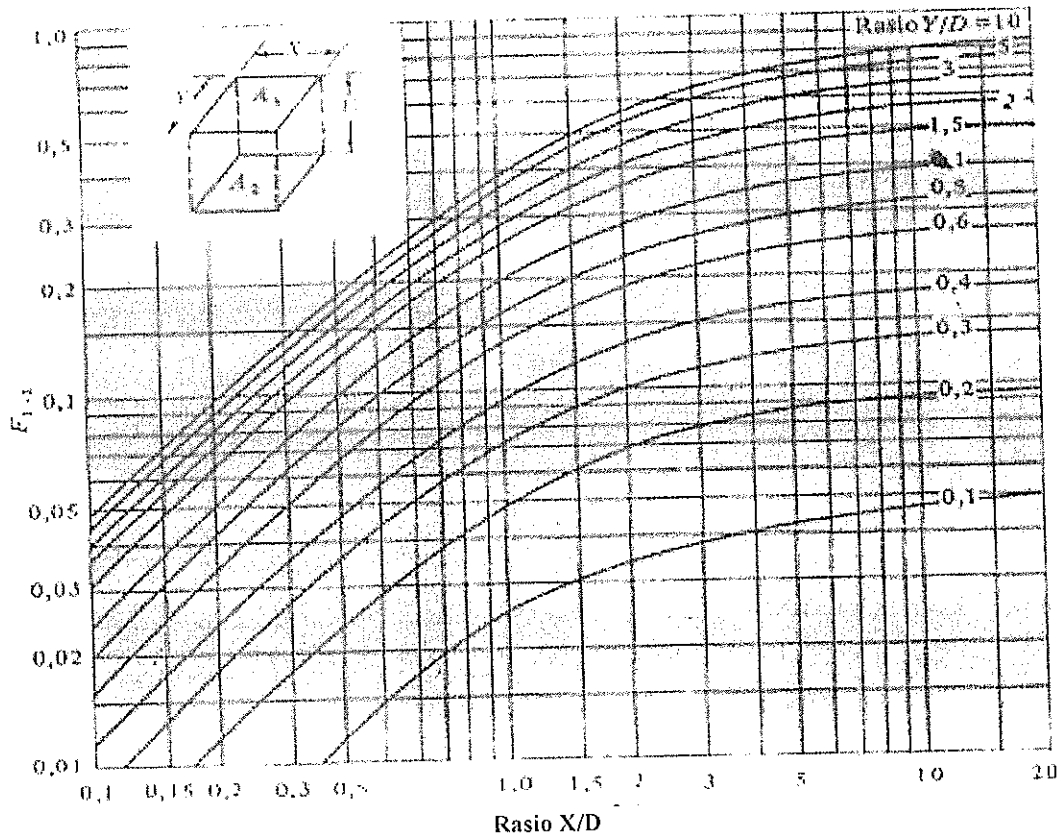
Sehingga pertukaran panas nettoanya menjadi :

$$q_{1-2} = A_1F_{12}(E_{b1} - E_{b2}) = A_2F_{21}(E_{b1} - E_{b2}) \quad (4.9)$$

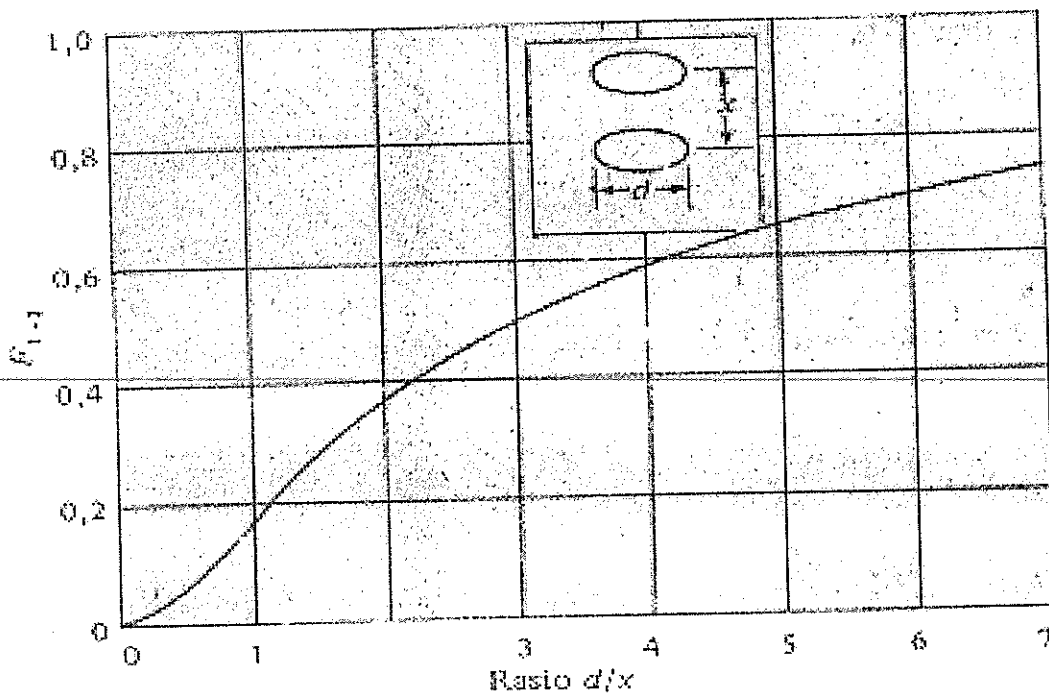
Persamaan (4.8) disebut hubungan resiprositas dan secara umum berlaku untuk dua permukaan m dan n

$$A_mF_{mn} = A_nF_{nm} \quad (4.10)$$

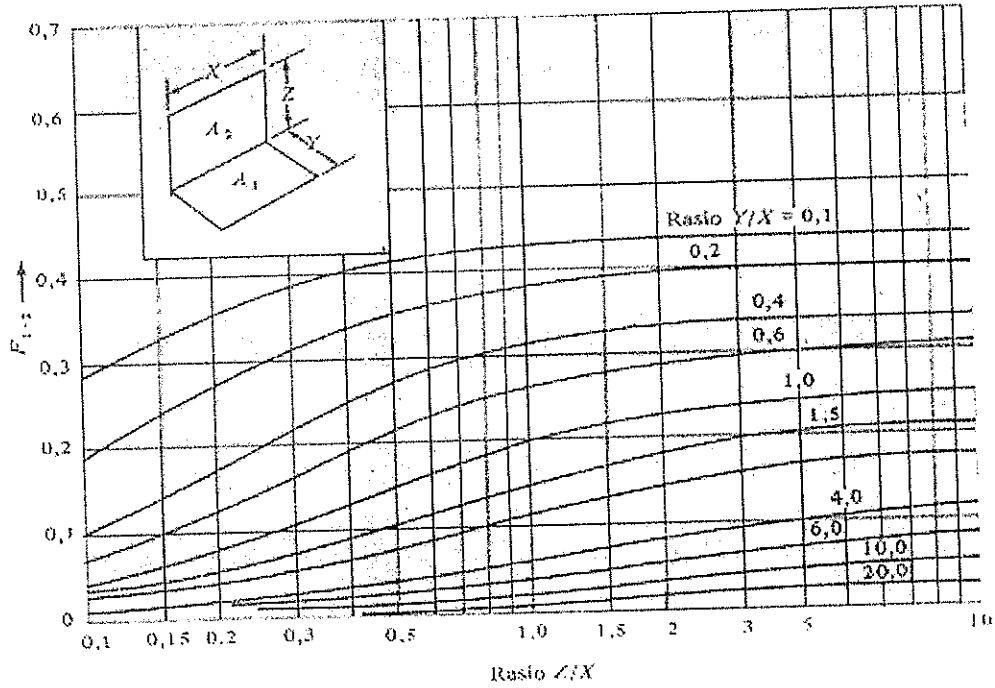
Berbagai factor bentuk dapat dilihat pada gambar 4.2 – 4.6.



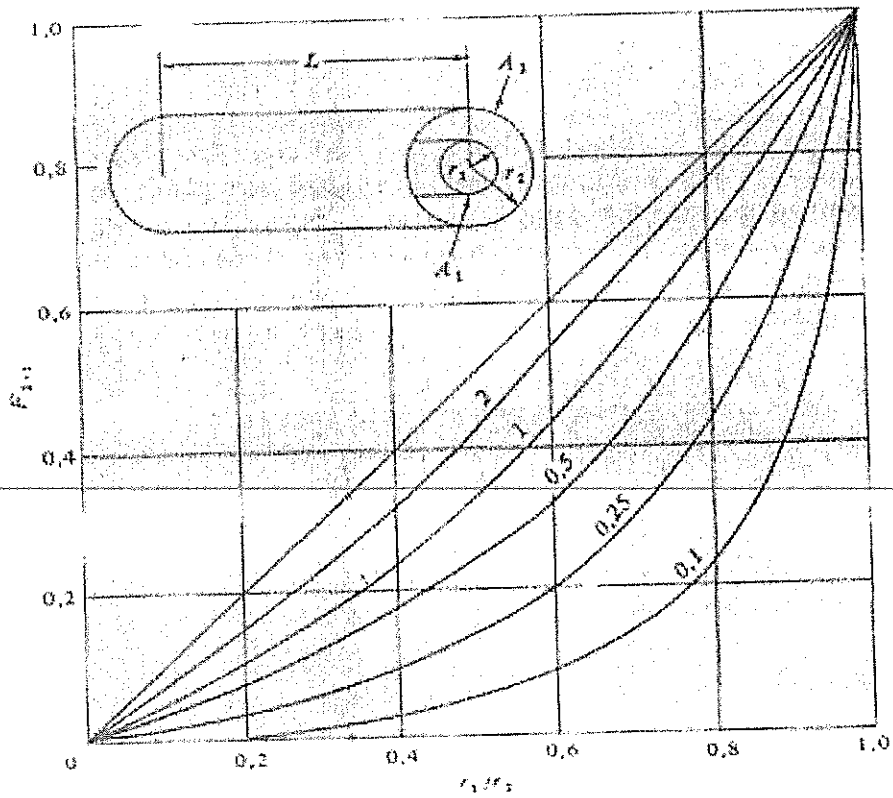
Gambar 4.2. Faktor bentuk radiasi untuk radiasi antara dua siku-empat sejajar



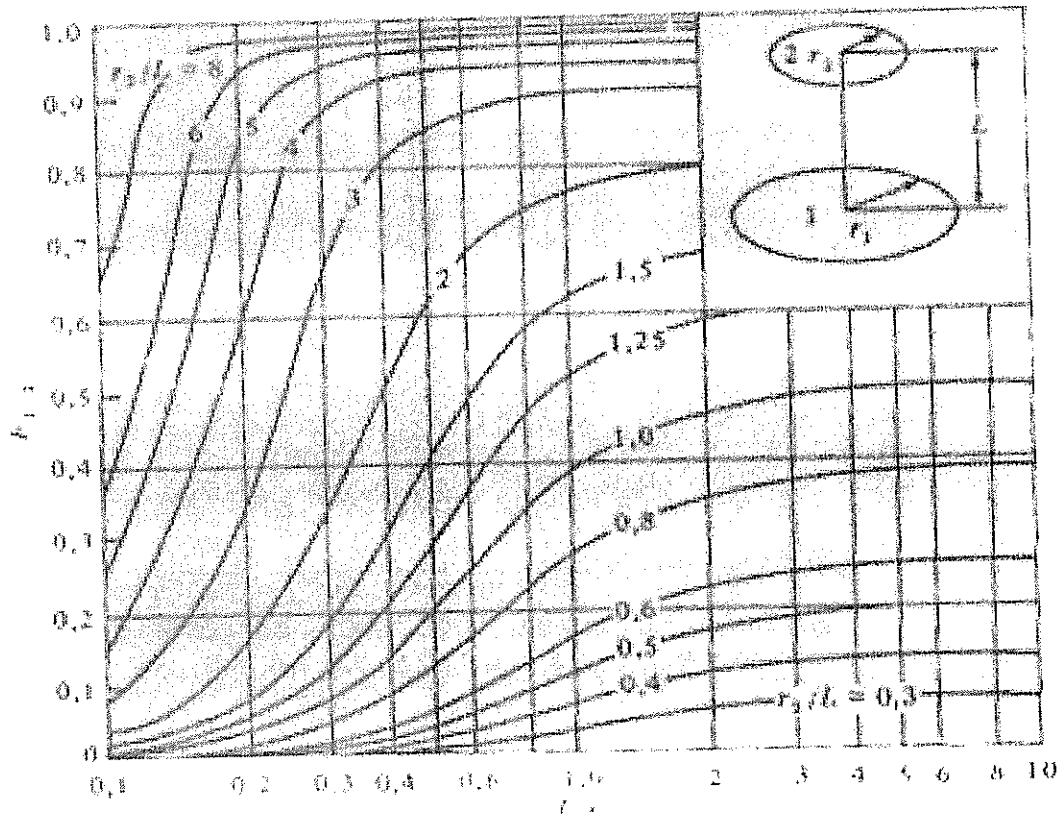
Gambar 4.3. Faktor bentuk radiasi untuk radiasi antara dua piring sejajar



Gambar 4.4. Faktor bentuk radiasi untuk dua siku-empat tegak lurus dengan satu sisi bersama



Gambar 4.5. Faktor bentuk radiasi untuk dua silinder konsentrik



Gambar 4.6. Faktor bentuk radiasi untuk dua piring konsentrik sejajar

4.4. HUBUNGAN BERBAGAI FAKTOR BENTUK

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

$$\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1 \quad (4.11)$$

Benda-benda tidak bisa memandang dirinya sendiri :

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

Untuk lengkung tiga permukaan dapat kita tuliskan :

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

Karena $F_{11} = 0$, maka $F_{13} = 1 - F_{12}$

4.5. PERTUKARAN PANAS ANTARA BENDA TAK HITAM

Pada perpindahan panas 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 sistem dan sebagian mungkin dipantulkan keluar sistem. Persoalannya bisa menjadi lebih kompleks karena panas yang dipancarkan dari satu permukaan dapat diabsorpsi dan sebagian dipantulkan kembali mengenai permukaan yang lain dan terjadi berkali-kali di antara permukaan penerima dan pemancar panas yang ada dalam lingkungan itu.

Diandaikan semua permukaan bersifat difus (baur, menyebar) dan mempunyai suhu seragam, emisivitas dan reflektivitas konstan di seluruh permukaan, maka dapat didefinisikan dua besaran baru yaitu

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

$$\begin{aligned}\alpha + \rho &= 1 \\ \rho &= 1 - \alpha = 1 - \varepsilon\end{aligned}\quad (4.12)$$

sehingga

$$J = \varepsilon E_b + \rho G \quad (4.13)$$

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

$$G = \frac{J - \varepsilon E_b}{1 - \varepsilon} \quad (4.14)$$

Energi netto yang meninggalkan permukaan adalah selisih antara radiositas dan iradiasi :

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

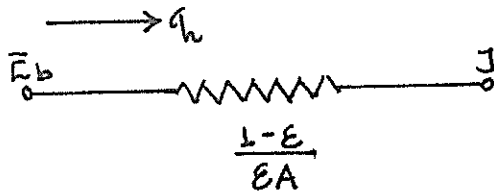
Masukkan persamaan (4.14), akan diperoleh

$$q = \frac{\varepsilon A}{1 - \varepsilon} (E_b - J) \quad (4.15)$$

Dari persamaan di atas diperoleh

$$q = \frac{(E_b - J)}{\frac{1 - \epsilon}{\epsilon A}} \cong \text{Arus} = \frac{\text{beda potensial}}{\text{tahanan permukaan}} \quad (4.16)$$

Jaringan permukaan



Sekarang kita tinjau 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 panas netto antara kedua permukaan adalah

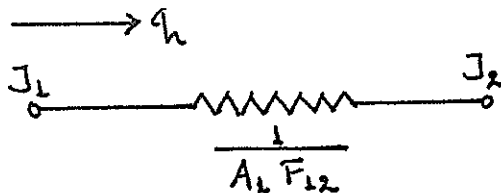
$$q_{12} = J_1 A_1 F_{12} - J_2 A_2 F_{21}$$

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

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

$$q = \frac{(J_1 - J_2)}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} \cong \text{Arus} = \frac{\text{beda potensial}}{\text{tahanan ruang}} \quad (4.17)$$

Jaringan ruang

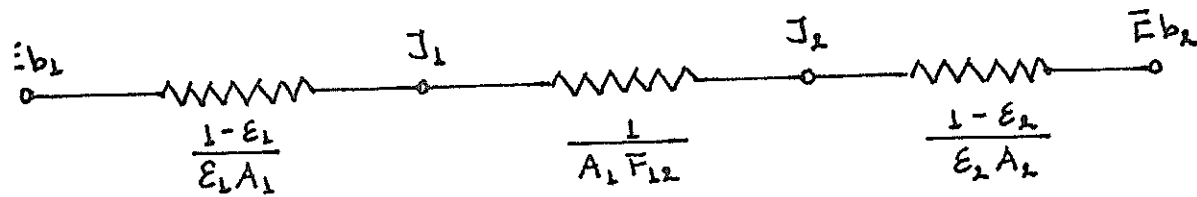


Jaringan radiasi merupakan gabungan antara jaringan permukaan dan jaringan ruang. Kedua unsur jaringan itu merupakan pokok-pokok metode jaringan radiasi (*radiation network method*).

4.6. PERPINDAHAN PANAS RADIASI ANTARA DUA PERMUKAAN

Perpindahan panas antara dua permukaan dan tidak ada permukaan lain di lingkungannya, pertukaran panas netto adalah beda potensial menyeluruh dibagi dengan jumlah semua tahanan.

Jaringan radiasi antara dua permukaan adalah



$$q_{\text{net}} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\sum R} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \quad (4.18)$$

$$q_{\text{net}} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \quad (4.19)$$

4.7. PERPINDAHAN PANAS RADIASI ANTARA TIGA PERMUKAAN

Dalam hal ini masing-masing benda bertukaran panas dengan permukaan lain.

Pertukaran panas antara benda 1 dan benda 2 adalah

$$q_{12} = \frac{(J_1 - J_2)}{\frac{1}{A_1 F_{12}}}$$

Pertukaran panas antara benda 1 dan benda 3 adalah

$$q_{13} = \frac{(J_1 - J_3)}{\frac{1}{A_1 F_{13}}}$$

Pertukaran panas antara benda 2 dan benda 3 adalah

$$q_{23} = \frac{(J_2 - J_3)}{\frac{1}{A_2 F_{23}}}$$

Jaringan radiasi antara tiga permukaan yang saling meradiasi adalah

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

$$\text{Node I} \quad : \quad \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1}} + \frac{J_2 - J_1}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} + \frac{J_3 - J_1}{\frac{1}{A_1 F_{13}}} = 0$$

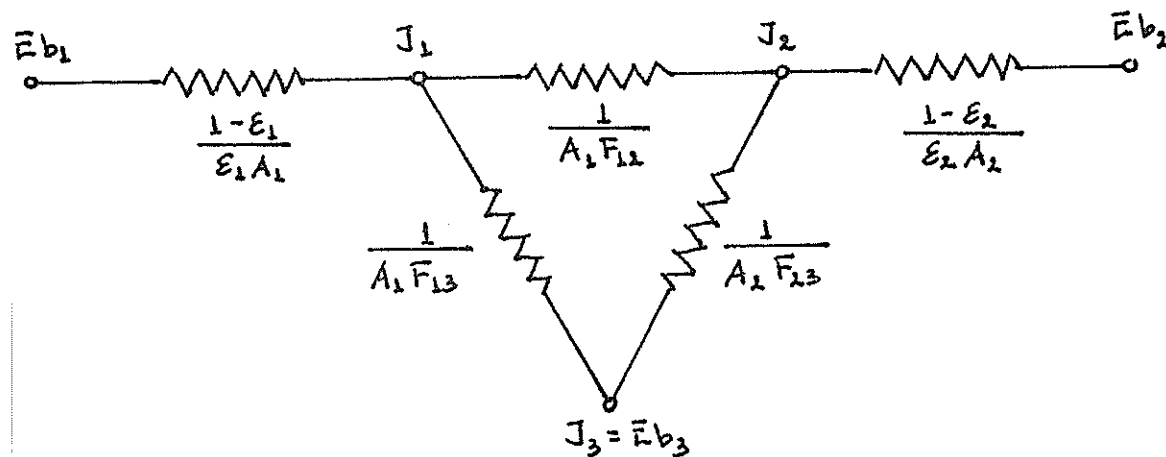
$$\text{Node II} \quad : \quad \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} + \frac{E_{b2} - J_2}{\frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} + \frac{J_3 - J_2}{\frac{1}{A_2 F_{23}}} = 0$$

$$\text{Node III} \quad : \quad \frac{J_1 - J_3}{\frac{1}{A_1 F_{13}}} + \frac{J_2 - J_3}{\frac{1}{A_2 F_{23}}} + \frac{E_{b3} - J_3}{\frac{1 - \epsilon_3}{\epsilon_3 A_3}} = 0$$

4.8. PERPINDAHAN PANAS RADIASI ANTARA DUA BIDANG DATAR YANG DIHUBUNGAN DENGAN BIDANG YANG TIDAK DAPAT MENGHANTARKAN PANAS TETAPI DAPAT MEMANTULKAN SEMUA PANAS YANG DITERIMA :

Suatu soal yang dapat dengan mudah diselesaikan dengan metode jaringan ialah soal dua permukaan rata yang saling bertukar panas, tetapi berhubungan dengan permukaan ketiga yang tidak menukar panas; artinya permukaan ketiga ini diisolasi sempurna. Namun permukaan ketiga ini mempengaruhi proses perpindahan panas, karena ia menyerap dan meradiasikan kembali energi ke kedua permukaan yang saling bertukar panas.

Jaringan radiasinya adalah



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

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

Nilai tahanan ruang :

$$\begin{aligned} F_{11} + F_{12} + F_{13} &= 1 \\ F_{11} &= 0 & F_{13} &= 1 - F_{12} \\ F_{21} + F_{22} + F_{23} &= 1 \\ F_{22} &= 0 & F_{23} &= 1 - F_{21} \end{aligned}$$

Dari hubungan resiprositas :

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$$

Jaringan ini merupakan suatu jaringan seri-paralel yang sederhana. Persamaan untuk perpindahan panas antara benda 1 dan 2 adalah :

$$q_{\text{netto}} = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{A_1 + A_2 - 2A_1 F_{12}}{A_2 - A_1 (F_{12})^2} + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (4.20)$$

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

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

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

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

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

Panas total yang dilepas plat 1 :

$$q_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}}$$

Panas total yang dilepas plat 2 :

$$q_2 = \frac{E_{b2} - J_2}{\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}$$

Panas yang diterima dinding kamar :

$$q_3 = q_1 + q_2$$

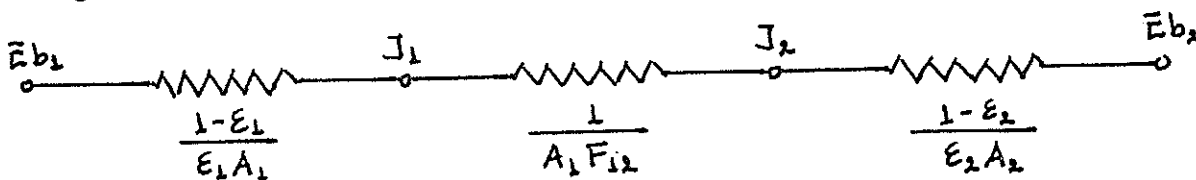
atau

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

4.9. BIDANG SEJAJAR TAK-HINGGA

Dua buah bidang sejajar tak-hingga, A_1 dan A_2 sama dan factor bentuk radiasi adalah satu karena semua radiasi yang meninggalkan bidang satu akan mencapai bidang lain.

Jaringan radiasi



$$A_1 = A_2 = A \quad \text{dan} \quad F_{12} = 1,0$$

Persamaan perpindahan panas per satuan luas adalah

$$\frac{q}{A} = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (4.21)$$

Untuk dua silinder panjang yang konsentris, $A_1 \neq A_2$ dan $F_{12} = 1,0$, maka perpindahan panasnya adalah

$$q = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \quad (4.22)$$

Perbandingan A_1/A_2 dapat diganti dengan perbandingan diameter d_1/d_2 bila kita mempersoalkan benda-benda berbentuk silinder.

TUGAS / LATIHAN

1. Sebuah kamar bujur sangkar berukuran 3×3 m mempunyai lantai yang dipanaskan hingga 300 K, loteng pada 290 K dan semua dinding diandaikan diisolasi sempurna. Tinggi kamar 2,5 m. Emisivitas setiap permukaan diandaikan 0,8. Dengan menggunakan metode jaringan, hitunglah pertukaran kalor netto antara lantai dan loteng serta suhu dinding !
2. Dua buah benda sejajar berukuran $X = 90$ cm dan $Y = 60$ cm terpisah oleh jarak 60 cm. Salah satu bidang dipelihara pada suhu 800 K dan mempunyai emisivitas 0,6. Bidang yang satu lagi diisolasi. Kedua bidang ditempatkan dalam suatu kamar besar yang suhunya dijaga 290 K. Hitunglah :
 - a. Suhu bidang yang diisolasi
 - b. Energi yang dilepas oleh bidang yang panas.
3. Suatu kerucut terpotong yang tingginya 30 cm terbuat dari alumunium. Diameter bagian atas ialah 7,5 cm dan diameter bagian bawah 12,5 cm. Suhu pada permukaan bagian bawah dipertahankan 93°C dan pada permukaan atas 540°C . Permukaan lainnya diisolasi. Andaikan semua permukaan hitam, berapakah laju perpindahan kalornya ?
4. Dua buah piring sejajar berdiameter 60 cm, terpisah pada jarak 15 cm. Suhu pada permukaan bagian atas adalah **XXX** $^{\circ}\text{C}$ dan suhu pada permukaan bagian bawah adalah 300 K. Andaikan semua permukaan hitam, berapakah laju perpindahan kalornya ?
5. Dua buah piring sejajar berdiameter 60 cm, terpisah pada jarak 15 cm dan terkurung sepenuhnya di dalam kamar besar yang suhunya 30°C . Sifat-sifat permukaan itu adalah $T_1 = \text{XXX}^{\circ}\text{C}$, $\epsilon_1 = 0,7$; $T_2 = 300$ K, $\epsilon_2 = 0,5$. Berapakah perpindahan kalor netto masing-masing permukaan ?
6. Sebuah kamar bujur sangkar berukuran 3×3 m mempunyai lantai yang dipanaskan hingga 300 K, loteng pada 290 K dan semua dinding diandaikan diisolasi sempurna. Tinggi kamar 2,5 m. Emisivitas setiap permukaan diandaikan 0,8. Hitunglah pertukaran kalor netto antara lantai dan loteng