

20-1 Penghantaran. Bila salah satu ujung sebatang logam dimasukkan ke dalam nyala api dan ujung yang lainnya kita pegang dengan tangan, bagian yang kita pegang ini makin lama makin panas, walaupun tidak langsung berhubungan dengan nyala api. Maka dikatakan, bahwa panas mencapai ujung yang dingin itu dengan jalan *penghantaran* lewat seluruh bahan batang tersebut. Pada waktu ujung yang panas naik suhunya, semua atom di bagian ini pun bertambah kuat getarannya. Tetapi atom-atom yang lebih dekat pada ujung yang dingin tetap masih lambat getarannya. Jika atom-atom dari kedua ujung tersebut ini bertumbukan, maka sebagian dari energi gerak atom yang lebih cepat akan terbagikan kepada yang lebih lambat. Sebaliknya, atom-atom lambat yang sudah menerima energi gerak ini selanjutnya meneruskan energi tadi ke atom-atom yang lebih jauh tempatnya dari api. Jadi, energi gerak termik diteruskan dari atom yang satu ke yang lainnya, sedangkan atom itu sendiri tetap tinggal di tempatnya semula.

Sudah diketahui pula, bahwa semua logam merupakan penghantar listrik dan penghantar panas yang baik. Bahwasanya logam dapat menghantar arus listrik ialah oleh karena apa yang disebut elektron "bebas" yang terdapat di dalamnya, yaitu elektron-elektron yang terenggut dari atom induknya. Elektron bebas itu juga memegang peranan dalam penghantaran panas. Sebabnya logam merupakan penghantar panas yang demikian baik ialah karena elektron bebas, dan juga atomnya, sama-sama meneruskan energi termik dari bagian logam yang lebih panas ke bagiannya yang lebih dingin.

Penghantaran panas di dalam suatu benda hanya mungkin terjadi jika bagian-bagian benda itu tidak sama suhunya. Arah arus panas senantiasa dari tempat yang bersuhu lebih tinggi ke tempat yang lebih rendah suhunya. Adakalanya peristiwa penghantaran panas ini digunakan sebagai dasar untuk mendefinisikan perbedaan atau persamaan suhu. Maksudnya, jika pada dua benda yang berhubungan timbul arus panas dari benda yang satu ke benda yang lainnya, maka berdasarkan definisi, suhu benda pertama lebih tinggi daripada suhu benda kedua. Jika tidak ada arus panas, berarti suhu keduanya sama tinggi.

Gambar 20-1 melukiskan sekeping bahan yang luas penampangnya  $A$  dan tebalnya  $L$ . Misalkan suhu di seluruh permukaan sebelah kiri adalah  $t_2$ , sedangkan suhu yang sebelah adalah suhu  $t_1$  yang lebih rendah. Maka arah arus panas ialah dari kiri ke kanan.

Setelah cukup lama suhu permukaannya yang sebelah kiri  $t_2$  dan yang kanan  $t_1$  maka suhu pada titik-titik di dalam bahan itu makin berkurang menurut jauh jaraknya dari permukaan yang panas. Tetapi lama-kelamaan suhu di setiap titik akan menjadi konstan. Maka dikatakanlah bahwa kepingan tersebut berada dalam "keadaan setimbang" panas. (Soal-soal tentang penghantaran panas yang tidak dalam kesetimbangan menyangkut metode matematika yang berada di luar bidang buku ini).

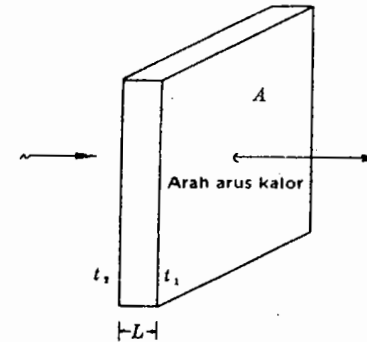
Berdasarkan percobaan terbukti, bahwa arus panas yang lewat bahan dalam kesetimbangan itu berbanding dengan luas permukaan  $A$ , berbanding dengan selisih suhu  $(t_2 - t_1)$  dan berbanding terbalik dengan tebal  $L$ . Andaikan  $H$  menyatakan arus panas, maka:

$$H \propto \frac{A(t_2 - t_1)}{L}$$

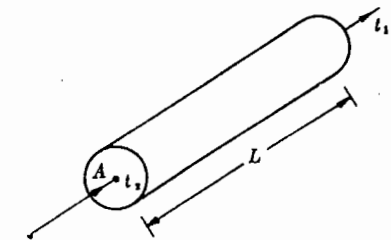
Perbandingan ini dapat dirubah menjadi persamaan, yaitu dengan mengalikannya dengan bilangan konstan  $K$  yang harga numeriknya tergantung dari macam bahan kepingan itu. Besaran  $K$  disebut *koefisien daya hantar (conductivity) thermo* atau sederhananya daya hantar thermo bahan bersangkutan

$$H = \frac{KA(t_2 - t_1)}{L} \quad (20-1)$$

Persamaan (20-1) juga dapat digunakan untuk menghitung cepatnya rata-rata arus panas mengalir arah menunjang tongkat yang sisinya diberi penyekat panas. Lihat Gambar 20-2, di mana huruf-hurufnya sama artinya dengan huruf-huruf pada Gambar 20-1.



Gambar 20-1. Penghantaran panas lewat kepingan bahan;



Gambar 20-2. Penghantaran panas sepanjang batang.

Mungkin juga terjadi, bahwa suhu di dalam benda yang dilalui arus panas tidak menurun secara teratur sepanjang arah arus panas, jadi tidak seperti pada Gambar 20-1. Ini dapat terjadi karena keadaan tidak setimbang atau karena bentuk geometrik penghantarnya. Dalam hal ini kita tinjaulah lapisan tipis  $dx$  dan selisih suhu antara kedua permukaannya  $dt$ . Maka persamaan (20-1) berubah menjadi:

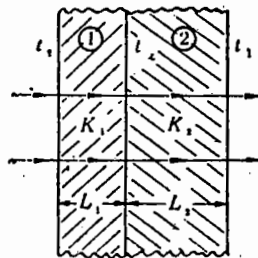
$$H = -KA \frac{dt}{dx} \quad (20-2)$$

PEMAPARAN PANAS  
TABEL XV  
DAYA HANTAR PANAS

Di sini digunakan tanda minus karena, jika bertambahnya suhu dari kiri ke kanan, arah arus panas justru dari kanan ke kiri. Persamaan (20-2) merupakan persamaan penghantaran panas yang umum. Perbandingan  $dt/dx$  disebut *gradien suhu*. Jadi Persamaan (20-1) itu mengenai keadaan yang istimewa di mana gradien suhunya konstan dan sama dengan  $(t_2 - t_1)/L$ .

Satuan cepatnya rata-rata aliran panas atau arus panas dalam sistem c.g.s. ialah satu kalori per detik. Suhu dinyatakan dengan derajat Celsius. Satuan untuk  $A$  dan  $L$  kiranya sudah terang. Daya hantar thermo bahan penyekat yang diperdagangkan, seperti gabus dan rock wool, biasanya dinyatakan dengan sistem "hybrid", di mana luas permukaan dinyatakan dengan kaki persegi (square feet), suhu dengan derajat Fahrenheit, tebal dengan inci dan arus panas dengan Btu per jam. Dalam sembarang sistem satuan, harga numerik  $H$  dan  $K$  sama jika  $A =$  satu satuan luas,  $t_2 - t_1 = 1$  derajat dan  $L =$  satu satuan panjang. Jadi dalam sistem komersial, harga numerik daya hantar thermo sama dengan jumlah Btu yang mengalir lewat bahan yang tebalnya satu inci dan luas permukaannya satu kaki persegi selama satu jam, jika beda suhu antara kedua permukaan bahan sama dengan satu derajat Fahrenheit.

Berdasarkan Persamaan (20-1) dengan jelas dapat difahami, bahwa makin besar arus panas makin besar harga daya hantar thermo  $K$ , asal harga dari faktor-faktor lain tetap. Jadi suatu bahan yang  $K$ -nya besar merupakan penghantar panas yang baik, sedangkan bahan yang  $K$ -nya kecil merupakan penghantar panas yang buruk atau bahan penyekat yang baik. Tidak ada terdapat "penghantar panas yang sempurna" ( $K = \infty$ ) ataupun "penyekat panas yang sempurna" ( $K = 0$ ). Walaupun demikian, dalam Tabel XV tercantum beberapa harga daya hantar panas yang dapat dipercaya, di mana dapat disaksikan, bahwa golongan logam mempunyai daya hantar panas yang lebih besar daripada golongan yang bukan logam.



Gambar 20-3. Pengaliran panas lewat dinding berlapis.

20-2 Arus panas lewat dinding berlapis. Gambar 20-3 melukiskan sebuah dinding berlapis, terdiri dari dua macam bahan yang tebalnya dan daya hantar panasnya tidak sama. Arus panas (yang dimaksudkan ialah cepatnya aliran panas) lewat bagian 1 ialah:

$$H = \frac{K_1 A (t_2 - t_x)}{L_1} \quad (20-3)$$

dan lewat bagian 2 ialah

$$H = \frac{K_2 A (t_x - t_1)}{L_2} \quad (20-4)$$

	$K$ (kal-cm/det-cm <sup>2</sup> ·C°)	$K$ (Btu in/j ft <sup>2</sup> F°)
<b>Logam:</b>		
Aluminium	0,49	
Kuningan	0,26	
Tembaga merah	0,92	
Timah hitam	0,083	
Air raksa	0,020	
Perak	0,97	
Baja	0,12	
<b>Berbagai bahan padat; (harga pukul rata)</b>		
Batu bata tahan api	0,0025	8
Batu bata penyekat	0,00035	1
Batu bata merah	0,0015	4
Beton	0,002	6
Gabus	0,0001	0,3
Vilt	0,0001	0,3
Gelas	0,002	6
Es	0,004	12
Rock Wool	0,0001	0,3
Kayu	0,0003-0,0001	9-3
<b>Gas:</b>		
Udara	0,000057	
Argon	0,000039	
Helium	0,00034	
Hydrogen	0,00033	
Oksigen	0,000056	

Dalam keadaan setimbang kedua arus ini harus sama (Mengapa?) Jadi:

$$\frac{K_1 A (t_2 - t_x)}{L_1} = \frac{K_2 A (t_x - t_1)}{L_2}$$

Dari ini dicari harga  $t_x$  lalu dimasukkan ke dalam Persamaan (20-3) atau (20-4). Maka kita peroleh

$$H = \frac{A(t_2 - t_1)}{L_1/K_1 + L_2/K_2}$$

Pada umumnya, untuk susunan sembarang jumlah lapisan,

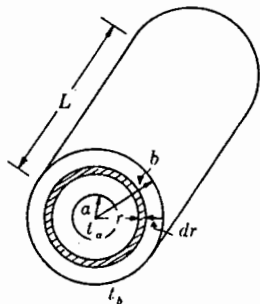
$$H = \frac{A(t_2 - t_1)}{\Sigma L/K} \quad (20-5)$$

20-3 Aliran panas lewat penyelubung pipa silindris. Gambar 20-4 melukiskan potongan tegak lurus penyekat panas silindris yang menyelubungi pipa uap. Radius dalam dan luar dari penyekat itu ialah  $a$  dan  $b$ , sedangkan  $t_a$  dan  $t_b$  ialah suhu sebelah dalam dan sebelah luar dari penyekat tersebut. Daya hantar panasnya  $K$ . Pandanglah selapis tipis kulit silinder yang bergaris-garis itu. Berdasarkan Persamaan (20-2), maka arus panas lewat kulit ini ialah:

$$H = -2\pi L K r \frac{dt}{dr}$$

di mana  $L$  ialah panjang kulit.

(Pertanyaan: Bagaimanakah seharusnya,  $dH$  atau  $H$ ?) Persamaan ini kemudian dapat diintegrasikan, hingga diperoleh ungkapan untuk arus panas yang di dalamnya terdapat faktor suhu bagian dalam dan suhu bagian luar dari penyekat.



Gambar 20-4. Pengaliran panas searah garis normal (radial).

$$H \frac{dr}{r} = -2\pi L K dt,$$

$$H \int_a^b \frac{dr}{r} = -2\pi L K \int_{t_a}^{t_b} dt,$$

$$H \ln \frac{b}{a} = 2\pi L K (t_a - t_b),$$

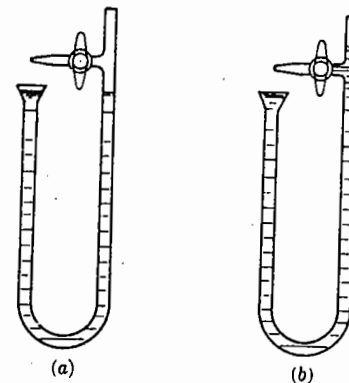
$$H = \frac{2\pi L K (t_a - t_b)}{\ln b/a} \quad (20-6)$$

Perhatikanlah: Satuan "hybrid" dari  $K$  seperti pada Tabel XV tidak dapat digunakan pada persamaan ini. Misalnya,  $K$  harus menyatakan jumlah Btu dalam satu satuan waktu yang lewat lapisan yang luasnya satu kaki persegi dan tebalnya satu kaki, sedangkan selisih suhu di antara kedua permukaan 1  $F^\circ$ .

20-4 Konveksi. Yang dimaksud dengan konveksi ialah pemaparan panas dari suatu tempat ke tempat lain oleh karena bahan panasnya sendiri yang bergerak. Sistem pemanasan yang memakai tungku udara panas (hot-air furnace) atau memakai air panas adalah beberapa contohnya. Jika bahan yang sudah dipanasi itu dipaksa bergerak dengan memakai pompa atau kipas (blower), prosesnya disebut proses konveksi dipaksa; sedangkan apabila pemaparan itu terjadi akibat

perbedaan densitas bahannya, prosesnya disebut proses konveksi wajar atau konveksi bebas. Untuk memahami macam proses yang disebut belakangan, perhatikanlah tabung U pada Gambar 20-5.

Pada (a) suhu air di dalam kedua kaki tabung U itu sama dan karena itu permukaan air di dalam keduanya sama tinggi. Di (b) kaki kanan sudah dipanasi. Air di dalam kaki kanan ini mengembang dan oleh sebab itu, karena densitasnya lebih rendah, diperlukan kolom yang lebih tinggi untuk mengimbangi tekanan kolom air yang dingin di sebelah kiri. Kran sekarang dibuka dan mengalirlah air dari bagian atas kolom yang lebih panas ke dalam kolom yang dingin. Ini mengakibatkan tekanan kolom dingin pada dasar tabung U bertambah besar, dan mengurangi tekanan kolom panas terhadap tempat tersebut. Oleh sebab itu di dasar tabung U air dipaksa bergerak dari bagian yang dingin ke bagian yang panas. Jika kaki yang panas terus-menerus diberi panas, sedangkan kaki yang dingin terus-menerus terambil panasnya, peredaran air akan berlangsung terus. Hasil netto nya ialah suatu pemindahan panas yang terus-menerus dari kolom yang panas ke kolom yang dingin. Pada sistem pemanasan yang memakai air panas di rumah-rumah, bagian yang "dingin" ialah radiator dan bagian yang "panas" ialah tungku (furnace).



Gambar 20-5. Aliran ditimbulkan oleh selisih rapat.

Penunaan air yang aneh, seperti disebut dalam Bab 18, mempunyai efek penting pada cara telaga atau kolam membeku waktu musim dingin (winter). Misalkan suhu sebuah kolam  $20^\circ C$  seluruhnya; pada suatu hari suhu udara di permukaannya turun sampai  $-10^\circ C$  dan air permukaan mendingin sampai katakanlah,  $19^\circ C$ . Akibatnya, air itu menjadi lebih besar densitasnya daripada air di bawahnya, lalu tenggelam ke dalam air yang kurang densitasnya, dan tempat yang ditinggalkannya diisi oleh air yang suhunya masih  $20^\circ C$ .

Tenggelamnya air yang sudah dingin tadi menyebabkan terjadinya proses pencampuran, yang terus berlangsung sampai suhu seluruh air menjadi  $4^\circ C$ . Tetapi sekarang, kalau air di permukaan kolam terus turun sampai  $3^\circ C$ , air ini malahan mengembang, menjadi kurang densitasnya dari air di bawahnya, dan karena itu mengambang di permukaan. Lalu tidak ada lagi konveksi dan penyampuran, dan sisa air hanya dapat hilang panasnya secara penghantaran. Karena air merupakan penghantar yang sangat buruk, maka setelah suhunya menjadi  $4^\circ C$ , pendinginannya lebih lanjut berlangsung sangat lambat, dengan akibat kolam itu membeku lebih dahulu di permukaannya. Maka es yang terjadi mengambang di atas air yang berada di bawahnya, karena densitas es lebih kecil lagi daripada densitas air pada  $0^\circ C$ . Pembekuan selanjutnya hanya dapat terjadi karena penghantaran panas dari bawah ke atas.

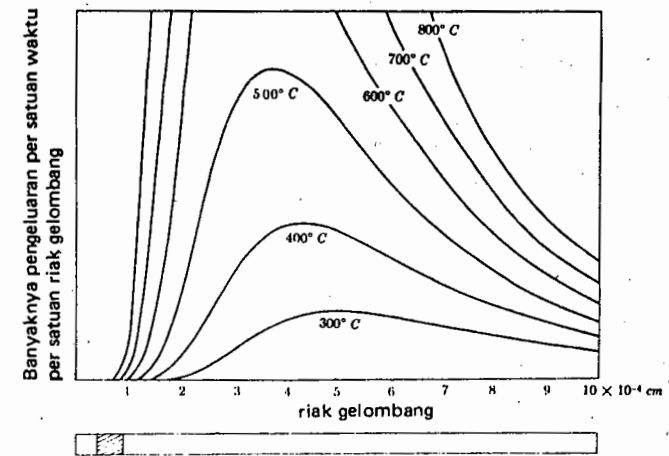
20-5 Radiasi. Bila seseorang menempelkan tangannya pada permukaan radiator air panas atau uap, panas sampai di tangannya karena *penghantaran* lewat dinding radiator. Jika tangan di tempatkan di atas radiator tetapi tidak langsung mengenainya, panas sampai ditangannya akibat *konveksi* udara hangat yang bergerak ke atas. Jika didekatkan kesisi samping radiator, tangan masih tetap akan panas, walaupun pengantaran panas lewat udara hanya sedikit sekali dan tangan tidak berada dalam arus konveksi tadi. Dikatakanlah bahwa energi panas sampai ke tangan karena *radiasi*.

Yang dimaksud dengan radiasi ialah emisi (pancaran) energi yang tidak putus-putus dari permukaan benda atau zat apa saja. Energi semacam ini disebut *energi pancar* (radiant energi dan berwujud gelombang elektromagnetik, yang identik sifatnya dengan gelombang cahaya, gelombang radio, atau sinar-X. Bedanya hanya terletak pada panjang gelombangnya. Gelombang-gelombang ini bergerak dengan kecepatan cahaya, baik melalui ruang hampa maupun lewat udara (gerakannya dalam ruang hampa sebenarnya lebih baik karena udara sedikit banyaknya menyerapnya). Kalau radiasi itu jatuh pada benda yang tidak dapat ditembusnya, misalnya permukaan tangan atau dinding kamar, gelombang itu akan diserap dan energinya berubah menjadi panas.

Energi pancar yang dikeluarkan oleh sebuah permukaan per satuan waktu dan per satuan luas, tergantung dari sifat permukaan dan suhunya. Pada suhu rendah, radiasi itu sedikit dan energi pancar terutama berupa panjang gelombang yang relatif panjang. Jika suhu dinaikkan, banyaknya radiasi bertambah dengan cepat, sebanding dengan suhu mutlak berpangkat 4. Pada waktu yang bersamaan, jumlah relatif dari energi pancar yang panjang gelombangnya pendek bertambah. Misalnya: balok tembaga merah yang suhunya 100° C (373° K) akan memancarkan kira-kira 300.000 erg/det atau 0,03 watt dari setiap cm<sup>2</sup> dari permukaannya. Pada suhu 500° C (773° K) benda tadi akan memancarkan kira-kira 4 watt dari tiap cm<sup>2</sup>. Ini merupakan 130 kali lagi lipat daripada banyaknya pemancaran pada 100° C.

Energi pancar yang dikeluarkan pada tiap-tiap suhu tersebut di atas berupa campuran dari gelombang yang bermacam-macam panjang gelombangnya. Pada 300° C yang terkuat di antara gelombang-gelombang itu mempunyai panjang gelombang kira-kira 5 x 10<sup>-4</sup> cm. Seperti ditunjukkan oleh garis lengkung pada Gambar 20-6, intensitas radiasi akan berkurang untuk panjang gelombang yang lebih besar maupun yang lebih kecil daripada tersebut di atas. Pembagian energi yang cocok dengan suhu yang lebih tinggi, juga dapat dilihat pada gambar itu. Luas yang dibatasi oleh tiap-tiap garis lengkung dan sumbu mendatar melukiskan banyaknya radiasi total pada suhu tersebut. Teranglah bahwa jumlah ini akan bertambah dengan cepat jika suhu naik; demikian pula panjang gelombang dari gelombang yang terkuat akan bergeser ke kiri; jadi ke arah panjang gelombang yang lebih pendek, jika suhunya naik.

Pada 300° C, praktis semua energi pancar yang dikeluarkan oleh sebuah benda diangkut oleh gelombang yang panjang gelombangnya lebih besar daripada panjang gelombang cahaya merah. Gelombang demikian itu disebut *merah infra*,



Gambar 20-6. Banyaknya per satuan waktu pengeluaran energi pancar oleh benda hitam (black body) per satuan riak gelombang sebagai fungsi dari riak gelombang. Daerah yang digaris-garis menunjukkan spectrum yang tampak mata.

maksudnya "dibalik merah". Pada 800° C sebuah benda akan mengeluarkan energi pancar yang cukup kuat sehingga menimbulkan cahaya sendiri yang kelihatannya merah nyala (red hot). Tetapi sebagian besar energi yang dipancarkan itu masih tetap diangkut oleh gelombang merah infra. Pada 3000° C, kira-kira sama dengan suhu filamen lampu pijar, energi pancar itu cukup mengandung gelombang yang panjang gelombangnya pendek, sehingga bendanya kelihatan merah memutih (white-hot).

20-6. Hukum Stefan. John Tyndall (1820-1893) dengan eksperimen-eksperimen mencoba mengukur berapa banyak energi terpancar dari suatu benda, dan kemudian pada tahun 1879 Josef Stefan (1835-1893) melanjutkan usaha Tyndall itu. Stefan menyimpulkan bahwa banyaknya energi yang terpancar dapat diungkapkan berdasarkan persamaan

$$W = e\sigma T^4 \quad (20-7)$$

disebut *hukum Stefan*.  $W$  berarti banyaknya pemancaran energi pancar per satuan luas dan dinyatakan dengan erg per detik per sentimeter persegi jika dipergunakan sistem c.g.s. dan dalam sistem m.k.s. dinyatakan dengan watt per meter persegi. Dalam satuan c.g.s. harga numerik bilangan konstan  $\sigma$  sama dengan  $5,672 \times 10^{-5}$  dan dalam satuan m.k.s.,  $5,672 \times 10^{-8}$ .  $T$  ialah suhu permukaan dinyatakan dengan Kelvin dan  $e$  ialah suatu besaran yang disebut *daya pancar* (emissivity) permukaan. Harga daya pancar ini terletak antara nol dan satu, bergantung pada sifat permukaan. Misalnya, daya pancar tembaga merah kira-kira 0,3. (Tepatnya, daya pancar pun terpengaruh sedikit oleh suhu, sekalipun untuk permukaan yang tidak berbeda. Umumnya permukaan kasar, besar daya pancarnya dan permukaan yang digosok halus, kecil daya pancarnya.

Timbul pertanyaan, bila permukaannya terus-menerus mengeluarkan energi pancar, mengapa semua benda tidak habis energi dakhilnya pada suatu saat lalu akhirnya dingin sampai mencapai titik nol mutlak? ( $W = 0$  menurut Persamaan (20-27). Jawabnya ialah: memang akan demikian halnya seandainya tidak diberikan energi lagi pada benda-benda tersebut dengan suatu cara. Dalam hal elemen alat pemanas Sunbowl atau filamen lampu listrik, energi yang ditambahkan untuk mengimbangi energi yang dipancarkan diberikan dengan jalan kelistrikan. Jika penambahan energi dihentikan, dengan cepat benda-benda tadi mencapai suhu kamar. Yang menyebabkannya tidak menjadi lebih dingin ialah karena keadaan sekelilingnya (dinding-dinding, benda lain di dalam kamar) juga memancarkan energi, dan sebagian energi pancar ini tercegat dan terserap di tengah jalan, lalu berubah menjadi panas. Ini berlaku bagi semua benda yang ada di dalam kamar itu; tiap benda memancarkan dan sekaligus menyerap energi pancar. Jika ada benda yang lebih panas daripada keadaan sekelilingnya, maka energi yang dipancarkannya lebih banyak daripada yang diserapnya. Jadi, sesungguhnya benda itu kehilangan energi dan akan menjadi dingin, kecuali kalau ditambahkan panas kepadanya dengan sesuatu jalan lain. Jika sebuah benda suhunya lebih rendah daripada sekelilingnya, maka energi yang diserapnya lebih banyak daripada yang dipancarkannya dan suhunya akan naik. Jika suhunya benda sama dengan suhu sekelilingnya, benda itu tidak akan bertambah atau berkurang energinya dan suhunya tidak berubah.

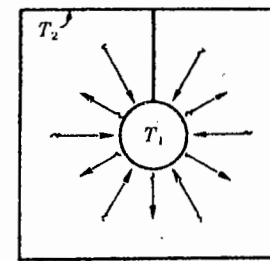
Jika suatu benda kecil yang daya pancarnya  $e$  sekujurnya dilingkungi oleh dinding yang suhunya  $T$ , maka banyaknya energi yang terserap olehnya ialah

$$W = e\sigma T^4.$$

Maka bila benda yang demikian itu suhunya  $T_1$  dan dikelilingi oleh dinding bersuhu  $T_2$ , jumlah *netto* pengurangan (atau tambahan) energi per satuan waktu akibat radiasi ialah

$$\begin{aligned} W_{\text{bersih}} &= e\sigma T_1^4 - e\sigma T_2^4 \\ &= e\sigma(T_1^4 - T_2^4). \end{aligned} \quad (20-8)$$

**20-7 Pemancar (radiator) sempurna.** Andaikan suhu dinding-dinding sebuah ruang tetap  $T_2$  (Gambar 20-7), lalu sejumlah benda yang berbeda daya pancarnya digantungkan di dalam ruang tersebut yang satu pada yang lain. Akan terbukti, bahwa setiap benda itu suhunya menjadi  $T_2$  pula, bahkan, jika ruang itu dihampakan sekalipun, biar bagaimana suhunya ketika dimasukkan ke dalam ruang tersebut. Jika ukuran benda-benda itu kecil dibandingkan ukuran ruang, energi pancar dari dinding-dinding akan mengenai permukaan setiap benda dengan jumlah yang sama banyaknya per satuan waktu. Sebagaian dari energi ini akan dipantulkan dan sisanya diserap. Jika di dalam ruang itu tidak ada proses-proses yang lain, energi yang diserap tadi akan menyebabkan kenaikan suhu benda yang menyerapnya. Tetapi karena ternyata suhu *tidak* berubah, tiap benda per satuan waktu harus



Gambar 20-7. Dalam kesetimbangan termik, banyaknya pengeluaran energi pancar per satuan waktu sama dengan banyaknya serapan per satuan waktu. Jadi penyerap yang baik juga adalah pemancar yang baik.

*mengeluarkan* energi pancar yang sama dengan yang *diserapnya*. Jadi, penyerap yang baik adalah pemancar yang baik dan penyerap yang buruk ialah pemancar yang buruk pula. Tetapi karena setiap benda atau menyerap atau memantulkan energi pancar yang jatuh padanya, maka penyerap yang buruk adalah juga pemantul yang baik. Jadi *pemantul yang baik* itu adalah *pemancar yang buruk*.

Inilah alasannya untuk melapisi dinding botol hampa ("thermos") dengan perak. Botol thermos itu dibuat dengan dinding rangkap dua dari gelas. Ruang di antara kedua dinding dibuat hampa, hingga pemaparan panas karena penghantaran atau pengaliran sudah tidak mungkin lagi. Supaya radiasi sekecil-kecilnya, dindingnya dilapisi dengan lapisan perak yang bersifat sangat memantulkan, dan dari itu ialah suatu pemancar yang buruk sekali.

Karena penyerap yang baik ialah pemancar yang baik pula, maka pemancar yang *terbaik* ialah permukaan yang berupa penyerap yang terbaik. Tetapi tidak ada permukaan yang dapat menyerap energi pancar lebih daripada yang jatuh padanya. Setiap permukaan yang menyerap semua energi pancar yang jatuh padanya akan merupakan pemancar yang sebaik-baiknya. Permukaan demikian ini tidak akan memantulkan energi pancar samasekali dan sebab itu warnanya akan tampak hitam (asalkan suhunya sendiri tidak begitu tinggi hingga mengeluarkan cahaya sendiri). Ini disebut permukaan hitam murni dan benda yang mempunyai permukaan demikian itu disebut benda hitam sempurna, atau pemancar sempurna atau benda hitam saja.

Sesungguhnya tidak ada permukaan yang hitam sempurna. Yang hampir hitam sempurna ialah jelaga lampu minyak tanah yang kita kenal (lamp-black). Daya pantulnya hanya kira-kira 1%. Kondisi benda hitam dapat diadakan dengan sebuah bejana tertutup yang diberi sebuah lubang kecil pada dindingnya. Energi pancar yang masuk ke dalamnya melalui lubang ini sebagian diserap oleh dinding dalam bejana. Dari bagian yang terpantul, hanya sedikit sekali yang keluar lagi lewat lubang. Sisanya akan diserap oleh dinding. Jadi, *lubang* ini bersifat seperti penyerap sempurna.

Sebaliknya, energi pancar yang dikeluarkan oleh dinding atau oleh semua benda yang mungkin ada di dalam ruang tertutup itu lalu terus keluar lewat lubang kecil

tadi, akan sama sifatnya seperti sifat energi pancar yang keluar dari radiator ser puna, asal suhu dinding tersebut uniform. Hal ini sangat penting kalau kita menggunakan pyrometer, yang dijelaskan pada halaman 354. Pembacaan pada alat ini hanya dapat tepat bila diarahkan kepada sebuah benda hitam. Bila digunakan untuk mengukur suhu besi batang yang merah-panas di ruang terbuka, pembacaan pada alat tersebut akan terlalu rendah, karena besi merupakan pemancar yang lebih buruk daripada benda hitam. Tetapi jika pyrometer itu diarahkan ke besi yang masih berada di dalam tungku, di mana besi itu dikelilingi oleh dinding-dinding yang suhunya sama dengan suhu besi, maka syarat benda hitam akan terpenuhi dan pembacaan menjadi tepat. Ketidakkampuan besi itu mengeluarkan energi pancar seefektif benda hitam tepat diimbangi oleh energi pancar yang dipantulkannya.

Daya pancar  $e$  suatu benda hitam sempurna sama dengan satu. Daya pancar permukaan yang biasa dalam praktek adalah kurang dari satu.

20-1. Sepotong bahan penyekat luasnya  $100 \text{ cm}^2$  dan tebalnya  $2 \text{ cm}$ . Daya hantar panasnya  $2 \times 10^{-4} \text{ kal/det-cm } ^\circ\text{C}$ . Jika selisih suhu antara kedua permukaan bahan itu sama dengan  $100^\circ \text{C}$ , berapakah jumlah kalori yang lewat bahan itu dalam sehari?

20-2. Satu ujung sebuah batang panjang, yang diliputi bahan penyekat agar tidak kehilangan panas, dicelupkan di dalam air mendidih yang tekanannya 1 atmosfer. Ujung yang kedua dimasukkan ke dalam campuran air es. Batang tersebut terdiri dari bagian tembaga merah yang panjangnya  $100 \text{ cm}$  (atau ujungnya dalam uap) dan bagian baja yang panjangnya  $L_2$  (atau ujung dalam campuran air es). Kedua bagian luas penampangnya sama dengan  $5 \text{ cm}^2$ . Pada waktu tercapai keadaan setimbang, suhu titik hubung antara tembaga merah dengan baja itu sama dengan  $60^\circ \text{C}$ . (a). Berapa kalorikah yang berpindah dari tempat uap ke tempat campuran air es tiap detiknya? Tentukanlah  $L_2$ !

20-3. Susunan lapisan sebuah batang, panjangnya 2 meter, terdiri dari inti pejal dari baja yang diameternya  $1 \text{ cm}$ , dikelilingi oleh pipa tembaga merah yang radius luarnya  $2 \text{ cm}$ . Permukaan luar dari batang ini diberi batang penyekat panas. Satu ujungnya suhunya tetap  $100^\circ \text{C}$ , sedangkan ujungnya yang lain suhunya tetap  $0^\circ \text{C}$ . Tentukanlah arus panas total di dalam batang itu! Tiap-tiap bahan bertanggung jawab atas berapa bagiankah?

20-4. Panas dipaparkan ke luar secara radial lewat penyekat silindris yang radius luarnya  $R_2$ , yang melingkungi sebuah pipa uap yang radius luarnya  $R_1$ . Temperatur permukaan penyekat yang sebelah dalam  $t_1$  dan yang sebelah luar  $t_2$ . Tentukanlah jarak tempat ke sumbu batang, yang suhunya sama dengan setengah jumlah  $t_1$  dengan  $t_2$ !

20-5. Temperatur sebatang tongkat pada permulaannya sama di mana-mana, yaitu  $0^\circ \text{C}$ . Lalu ujungnya yang satu suhunya tetap  $0^\circ \text{C}$ , sedangkan ujung yang lain dikenakan uap yang suhunya  $100^\circ \text{C}$ . Permukaan sisi tongkat ini diberi bahan penyekat, hingga pemaparan panas hanya dapat terjadi dalam arah panjang tongkat saja. Luas penampang

tongkat  $2 \text{ cm}^2$ , panjangnya  $100 \text{ cm}$ , daya hantar panasnya  $0,8 \text{ kal/det-cm } ^\circ\text{C}$ , rapatnya  $10 \text{ gm/cm}^3$  dan panas jenisnya  $0,10 \text{ kal/gm } ^\circ\text{C}$ . Pandanglah unsur silindris dari tongkat tersebut, sepanjang  $1 \text{ cm}$ . (a). Berapakah panas yang lewat satu ujung unsur ini per detik, jika gradien suhu ujung ini  $200^\circ \text{C/cm}$ ? (b). Jika suhu rata-rata unsur ini tiap detiknya naik 5 derajat Celsius, berapakah gradien suhu ujung lain dari unsur ini?

20-6. Sebuah bola dari tembaga merah massanya  $4700 \text{ gm}$  dan radiusnya  $5 \text{ cm}$ . Bola ditutupi dengan bahan penyekat yang tebalnya  $5 \text{ cm}$  (radius luarnya  $10 \text{ cm}$ ). Daya hantar bahan penyekat  $0,002 \text{ kal-cm/det-cm}^2 ^\circ\text{C}$  dan permukaannya yang sebelah luar suhunya tetap  $20^\circ \text{C}$ . Panas jenis tembaga merah  $0,093$ . (a). Jika suhu bola tembaga merah suhunya  $100^\circ \text{C}$ , berapakah arus panas lewat bahan penyekat tadi? (b). Kira-kira berapakah waktu yang diperlukan oleh tembaga merah tadi supaya suhunya dari  $100^\circ \text{C}$  menjadi  $99^\circ \text{C}$ ?

20-7. (a). Kolom air di dalam kaki yang sebelah kanan dari tabung U pada Gambar 20-5 dipanasi hingga  $80^\circ \text{C}$ , sedangkan kaki yang kiri temperatur tetap  $4^\circ \text{C}$ . Berapakah perbedaan tinggi kolom-kolom air itu? (b). Andaikan tiap-tiap kolom air tingginya  $10 \text{ m}$ , tetapi suhu yang kanan  $80^\circ \text{C}$ , sedangkan yang kiri  $4^\circ \text{C}$ , berapakah perbedaan tekanan pada dasar tabung U itu?

20-8. Dinding-dinding sebuah tungku dibuat dari batu tahan api setebal 6 inci. Daya hantarnya demikian rupa, hingga timbul pemaparan  $3,6 \text{ Btu}$  dalam satu jam lewat permukaan seluas  $1 \text{ ft}^2$  dan tebal 1 inci waktu selisih suhu antara permukaan-permukaannya  $1^\circ \text{F}$ . Suhu dinding sebelah dalam  $1000^\circ \text{F}$  dan sebelah luar  $100^\circ \text{F}$ . (a). Kita ingin mengurangi kehilangan panas menjadi 50% dari kehilangan sebelumnya dengan menempatkan lapisan batu bata penyekat di luar batu tahan api tadi. Daya hantar panas batu penyekat ini  $1/3$  daripada untuk batu tahan api. Tentukanlah tebal lapisan batu penyekat itu! (b). Berapakah Btu yang dipaparkan lewat satu kaki persegi dari dinding yang sudah diberi penyekat ini dalam satu jam? (c). Berapakah suhu bidang pertemuan antara batu tahan api

2975  
2975  
13

dengan batu penyekat? Misalkan suhu di dalam dan di luar tidak terpengaruh dengan ditematkannya lapisan penyekat tersebut.

20-9. Batang-batang dari tembaga merah, kuningan dan baja dilas menjadi bentuk Y. Luas penampang lintang masing-masing batang  $2 \text{ cm}^2$ . Suhu ujung tembaga merah tetap  $100^\circ \text{ C}$ , sedangkan suhu ujung kuningan dan baja tetap  $0^\circ \text{ C}$ . Andaikan tidak ada panas yang lenyap dari permukaan-permukaan batang-batang itu. Panjang batang tembaga merah 46 cm, kuningan 13 cm dan baja 12 cm. (a). Berapakah suhu titik hubungannya? (b). Berapakah arus panas dalam batang tembaga merah?

20-10. Sebuah bejana, luas permukaannya  $5000 \text{ cm}^2$  dan tebalnya 2 cm, berisi air dan di dalamnya juga terdapat sebuah pengaduk. Permukaan sebelah luar dari bejana suhunya tetap  $0^\circ \text{ C}$ . Daya hantar panas dindingnya  $0,000478 \text{ kal-cm/det-cm}^2 \text{ C}^\circ$ . Efek tepi dan sudut dapat diabaikan. Ternyata daya yang diperlukan untuk menggerakkan pengaduk tadi dengan kecepatan sudut 1800 rpm ialah 100 watt. Jika keadaan setimbang sudah tercapai, berapakah suhu terakhir dari air di dalam bejana? Andaikan pengaduk itu menyebabkan seluruh massa air bersuhu merata.

20-11. Sebatang tembaga merah panjangnya 20 cm dan luas penampangnya  $2 \text{ cm}^2$  dilindungi oleh selubung penyekat yang terbuat dari bahan yang daya hantar panasnya

$0,01 \text{ kal/det-cm C}^\circ$  dan tebalnya 0,4 cm. Ujung yang satu dari batang suhunya tetap  $0^\circ \text{ C}$  sedangkan ujung lainnya suhunya tetap  $100^\circ \text{ C}$ . Andaikan gradien suhu sepanjang batang tersebut linier. (a). Carilah suatu rumus yang menyatakan banyaknya kehilangan panas per detik lewat sebagian dari selubung tadi yang penjangnya  $dx$  dan letak tempatnya  $x$  dari ujung yang suhunya  $0^\circ \text{ C}$ . (b). Integrirlah rumus di atas untuk memperoleh kehilangan panas total setiap detiknya lewat penyulung tadi!

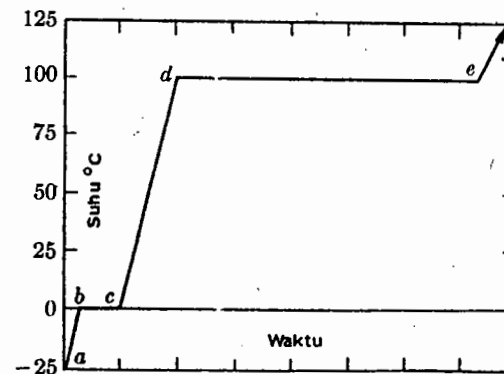
20-12. Sebuah kotak yang berbentuk kubus, rusuknya 2 ft, dibuat dari papan penyekat yang daya hantar panasnya  $0,4 \text{ Btu-in/hr-ft}^2 \text{ F}^\circ$  dan tebalnya  $\frac{1}{2}$  inci. Di dalam kotak itu ditempatkan alat pemanas listrik yang menghasilkan 600 watt. Tentukanlah selisih suhu antara sisi dalam dan luar kotak, jika keadaan setimbang sudah tercapai.

20-13. Sebetulnya daya hantar panas semua bahan terpengaruh sedikit oleh suhu. Andaikan daya hantar panas sesuatu bahan ditentukan oleh rumus  $K = K_0 (1 + at)$ . Di sini  $a$  ialah bilangan konstan sedangkan  $t$  suhu dengan derajat Celsius. (a). Turunkanlah persamaan untuk arus panas lewat lapisan dari bahan ini yang luasnya  $A$ , tebalnya  $L$ , jika suhu permukaan-permukaan yang berhadapan-hadapan  $t_1$  dan  $t_2$ . (b). Tentukanlah suhu di tengah-tengah antara kedua permukaan tersebut, jika  $t_2 = 100^\circ \text{ C}$  dan  $t_1 = 0^\circ \text{ C}$  sedangkan  $a = 0,02 (\text{C}^\circ)^{-1}$ .

## PERUBAHAN FASE

21-1 Perubahan fase. Kata *fase* yang dipergunakan di sini bersangkutan dengan kenyataan, bahwa suatu materi itu dapat berwujud sebagai zat padat, zat cair atau gas. Jadi zat kimia  $\text{H}_2\text{O}$  dalam *fase padat* berwujud sebagai es, dalam *fase cair* sebagai air dan dalam *fase gas* sebagai uap. Asalkan tidak terurai pada suhu yang tinggi, semua zat-zat dapat berwujud salah satu dari ketiga fase tersebut dengan syarat suhu dan tekanan yang cocok. Dengan pergantian dari fase yang satu ke fase yang lain itu, terjadi pula serapan atau pembebasan panas, dan biasanya juga perubahan volum.

Sebagai contoh, ambillah es dari almari es yang suhunya misalnya  $-25^\circ \text{ C}$ , lalu remukkan dengan cepat dan masukkan ke dalam suatu bejana, kemudian selipkan thermometer ke dalam remukan itu. Andaikan bejana itu dilingkari oleh kumparan pemanas yang memberikan panas pada es tadi dengan jumlah yang sama per satuan waktu dan tidak ada panas lain yang sampai pada es itu! Maka suhu es ternyata naik dengan teratur, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 21-1, dari  $a$  ke  $b$ , atau sampai suhunya mencapai  $0^\circ \text{ C}$ . Segera suhu ini tercapai, dalam bejana itu timbullah air dalam bentuk zat cair. Dengan perkataan lain, es itu mulai lebur. Proses peleburan ini ialah suatu *perubahan fase* dari fase padat ke fase cair. Tetapi selanjutnya, thermometer *tidak akan menunjukkan kenaikan* suhu walaupun terus-menerus diberikan panas dengan jumlah per satuan waktu yang sama seperti sebelumnya. Suhu akan tetap  $0^\circ \text{ C}$  hingga semua es sudah melebur (Titik  $c$ , Gambar 21-1). (Campuran es dan air itu harus terus-menerus diaduk betul; kalau tidak, suhu bagian air yang terdekat pada alat pemanas akan naik di atas  $0^\circ \text{ C}$ ).



Gambar 21-1. Selama tiap-tiap perubahan fase, suhu tetap konstan.

Jika seluruh es sudah melebur semuanya, suhu akan naik lagi secara teratur dari  $c$  ke  $d$  (Gambar 21-1), walaupun cepat naiknya lebih lambat daripada dari