

... dan MECHANICS, HEAT and SOUND oleh Francis Weston
terkecpta 1950 pada Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Diterbitkan
Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts.

SERI ASAS-ASAS FISIKA I

Seri Kh

... is an authorized translation of MECHANICS, HEAT and SOUND by
Weston Sears. Copyright, 1950 by Addison-Wesley Publishing Company,
published by Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachu-

MEKANIKA, PANAS dan BUNYI

Diterbitkan dengan kerjasama
Yayasan Dana Buku Franklin
Jakarta — NEW YORK.

16 Mei 1962.

Oleh

FRANCIS WESTON SEARS

Profesor Fisika

Massachusetts Institute of Technology

Saduran Bebas

oleh

Ir. P.J. Soedarjana

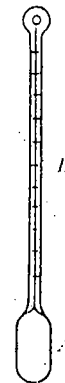


SUHU – PEMUAIAN

18-1 Suhu. Suhu sesuatu benda ialah ukuran panas atau dinginnya secara relatif. Apabila kita meraba sebuah benda, maka perasaan kita memungkinkan kita dapat menaksir suhu benda tersebut secara kira-kira seperti halnya kita dapat menaksir besar kecilnya sesuatu gaya dengan otot-otot kita. Teranglah bahwa perasaan kita itu terbatas sekali kesanggupannya untuk menentukan dengan tepat panas dinginnya sesuatu, apalagi dalam pekerjaan keteknikan atau keilmuan. Untuk *mengukur* suhu kita harus mempergunakan sesuatu sifat fisis yang dapat diukur, yang berubah dengan berubahnya suhu; jadi tepat seperti pada pengukuran gaya, di mana kita mempergunakan sesuatu sifat benda yang berubah dengan berubahnya gaya, seperti misalnya pada per sulur. Alat yang digunakan untuk mengukur suhu disebut *thermometer*.

18-2 Thermometer. Beberapa sifat fisis yang berubah karena suhu ialah panjangnya sebuah batang, volum zat cair, tahanan kawat terhadap aliran listrik atau warna filamen lampu pijar. Pada hakekatnya perubahan-perubahan ini digunakan pada konstruksi bermacam-macam thermometer.

Sekarang mari kita meninjau thermometer umum, yaitu thermometer *zat cair dalam gelas*. Alat ini, yang dilukiskan pada Gambar 18-1, terdiri dari bola gelas



Gambar 18-1. Thermometer zat air dalam gelas.

A yang berdinding tipis. Bagian atas dari bola ini dihubungkan dengan pipa kapiler panjang, yaitu B. Zat cair, misalnya air raksa atau alkohol berwarna, mengisi sebagian bola dan pipa tersebut. Bagian atas dari pipa itu tertutup dan biasanya ruang di atas zat cair dihilangkan udaranya. Untuk mengukur tinggi permukaan air raksa di dalamnya itu diadakan pembagian skala yang digoreskan pada pipa tersebut. Atau dapat pula ditempelkan pembagian skala tersendiri di belakangnya. Jika suhu thermometer naik, volum zat cair pun bertambah, demikian pula volum bola dan pipa kapiler. Jika pemuaian kedua-

nya itu sama, maka posisi zat cair di dalam kapiler tidak akan berubah. Tetapi zat cair sebenarnya memuai lebih cepat dari pada bola. Maka bila suhu naik, permukaan zat cair di dalam kapiler naik pula, dan turun bila suhu menjadi lebih rendah. Jadi alat ini didasarkan pada *selisih* pemuaian antara zat cair dengan gelas.

18-3. Skala suhu. Di dalam kehidupan sehari-hari dan pekerjaan teknik (di Amerika Serikat) dipergunakan skala suhu *fahrenheit*. Dalam kerja keilmuan di seluruh dunia, suhu dinyatakan dengan *derajat Celsius*. Waktu menentukan kedua macam skala itu, diambillah dua suhu perbandingan yang disebut *titik-titik tetap*. Lalu diberikannya harga-harga sekehendak pada kedua suhu itu; jadi menetapkan sikap titik nol dan ukuran satuan suhu.

Salah satu patokan suhu, yaitu *titik es*, ialah suhu campuran air jenuh udara dengan es di bawah tekanan satu atmosfer. Suhu patokan lainnya, yaitu *titik uap*, ialah suhu air mendidih di bawah tekanan satu atmosfer. Pada skala Celsius, titik es dibubuhi harga 0 sedangkan titik uap harga 100. Pada skala Fahrenheit suhu-suhu ini dibubuhi harga 32 dan 212.

Dengan memakai thermometer zat cair dalam gelas ini maka sembarang suhu t (pada skala Celsius) ditentukan sebagai suhu yang menghasilkan perubahan volum relatif sebesar $t/100$ dari selisih volum pada titik es dan pada titik uap. Jika luas penampang pipa kapiler itu sama di mana-mana, maka pernyataan di atas sama artinya dengan pernyataan, bahwa suhu berbanding langsung dengan panjang kolom zat cair dihitung mulai dari titik es. Dengan perkataan lain, jika sikap permukaan zat cair pada tabung ditandai sebagai berikut: mula-mula waktu thermometer dimasukkan ke dalam campuran es air, sesudah itu ke dalam air murni yang mendidih dengan tekanan satu atmosfer, maka jarak antara kedua tanda ini dapat dibagi menjadi 100 bagian yang sama besarnya dan dibubuhi nomer urut dari 0 sampai 100. Selang suhu yang sesuai dengan tiap-tiap pembagian tadi disebut satu derajat Celsius. Pemberian angka itu dapat pula dilanjutkan di atas 100 dan di bawah nol. Skala Fahrenheit diperoleh dengan cara yang mirip dengan di atas. Yaitu membagi kolom di antara titik es dengan titik uap menjadi 180 bagian, lalu meneruskan pembagian ini baik ke atas maupun ke bawah.

Pada skala Celsius selang suhu di antara titik es dengan titik uap dibagi menjadi 100 derajat, sedangkan pada skala Fahrenheit menjadi 180 derajat. Maka satu derajat Celsius sesuai dengan 180/100 atau 9/5 derajat Fahrenheit.

Titik nol pada skala Fahrenheit terdapat 32 derajat Fahrenheit di bawah titik es. Suhu-suhu di bawah titik nol pada kedua macam skala dipandang mempunyai harga negatif. Hubungan antara kedua skala mudah diingat dengan pertolongan diagram pada Gambar 18-2.

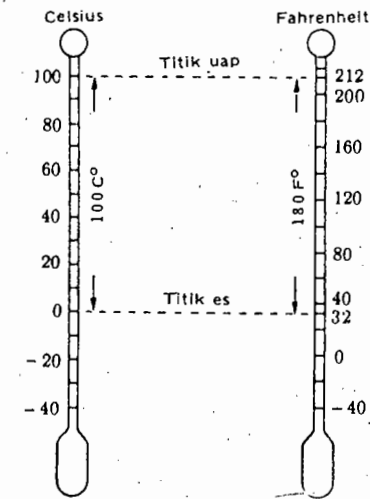
PERHATIKANLAH! Misalkan suhu segelas air kita naikkan dari 20°C sampai 30°C, jadi melalui 10 selang derajat Celsius. Ada baiknya untuk membedakan selang suhu demikian dengan suhu 10 derajat di atas titik nol. Maka kita selanjutnya akan menyebut "10 derajat Celsius" atau "10°C" jika yang kita maksudkan *suhu sesungguhnya*; dan "10 Celsius derajat" atau ditulis 10 C° jika yang kita maksudkan *selang* atau selisih suhu. Jadi, selang suhu antara 20°C dan 30°C adalah 10 C°.

Cara berikut ini dapat digunakan untuk mengkonversi harga suhu pada sebuah skala ke harganya pada skala yang lain. Misalnya, 30°C berarti bahwa ada selang

suhu sebesar 30 Celsius derajat antara suhu ini dengan titik es. Karena 1°C = $\frac{9}{5}$ F° (bukan 1°C = $\frac{5}{9}$ F°), maka 30°C = $30 \times \frac{9}{5} = 54$ F°. Jadi, suhu ini terletak 54F° di atas titik es. Karena suhu titik es ialah 32°F, maka suhu yang seharga dengan 30°C ialah 54 + 32 = 86°F. Dengan jalan pikiran seperti di atas kita peroleh hubungan berikut :

$$F = \frac{9}{5}C + 32 \quad C = \frac{5}{9}(F - 32),$$

di mana F dan C berturut-turut berarti suhu yang sama pada skala Fahrenheit dan skala Celsius. Apa hubungan antara suatu *selang* suhu tertentu pada skala fahrenheit dan pada skala celsius ?



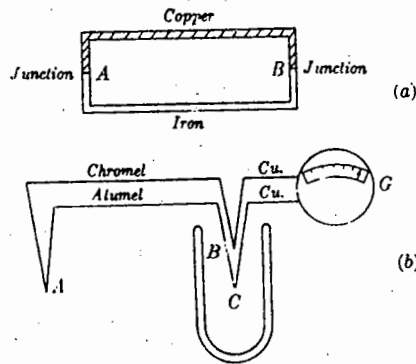
Gambar 18-2. Hubungan antara skala Celsius dengan skala Fahrenheit.

Sudah barang tentu tidak ada alasan, mengapa pembagian skala pada kedua macam skala tidak dapat diteruskan sampai tak terhingga, baik ke atas maupun ke bawah nol. Tetapi kelak kita akan melihat, bahwa baik teori maupun eksperimen menunjukkan adanya batas untuk suhu *terendah* yang dapat tercapai, walaupun untuk suhu yang setinggi-tingginya tidak ada batas teoretiknya. Suhu terendah yang dapat dicapai dikenal dengan nama nol *mutlak*, dan tempatnya ialah pada $-273,2^{\circ}\text{C}$, dibulatkan menjadi -273°C . Untuk beberapa keperluan tertentu, lebih mudah untuk mempergunakan skala suhu yang titik nolnya adalah titik nol mutlak. Suhu-suhu pada skala ini disebut suhu mutlak, dan baik skala Fahrenheit mutlak dan skala Celsius mutlak dipergunakan. Skala Celsius mutlak juga disebut skala Kelvi, sebagai penghormatan kepada Lord Kelvin yang mula-mula menyarankan penggunaannya. Suhu pada skala Kelvin secara numerik 273 derajat lebih besar daripada di skala Celsius, sehingga titik es terletak pada 273°K , dan titik uap pada 373°K .

Suhu titik nol mutlak pada skala Fahrenheit ialah -460° dan harga numerik suhu pada skala Fahrenheit mutlak terdapat 460 lebih tinggi daripada di skala Fahrenheit. Jadi suhu titik es ialah 492° F mutlak dan titik uap sama dengan 672° F mutlak.

18-4 Beberapa metode lain pengukuran panas. Air raksa membeku pada -40° C dan tekanan uapnya (lihat Bag. 23-3) menjadi sangat berlebihan tingginya pada suhu di atas 360° C. Sebab itu batas pengukuran thermometer raksa-dalam-gelas adalah antara suhu-suhu ini. Untuk mengukur suhu yang lebih rendah dari -40° C misalnya, dipergunakan thermometer yang zat cairnya alkohol, yang membeku pada -130° C, atau pentana, yang membeku pada -200° C.

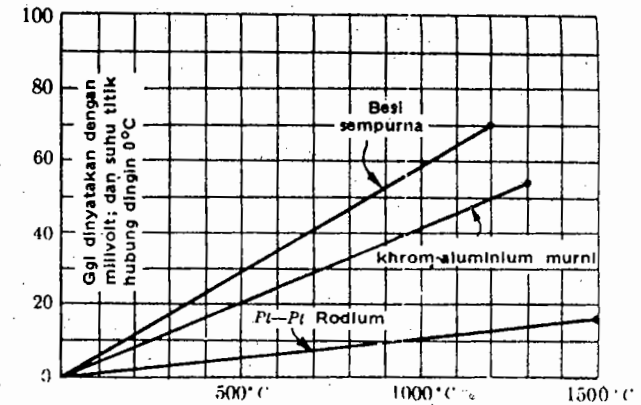
Thermometer tahanan didasarkan pada kenyataan, bahwa tahanan listrik bahan logam bertambah jika suhu naik. Thermometernya sendiri terdiri dari kawat halus, biasanya dari platina, yang dililitkan pada rangka dari mika dan dimasukkan ke dalam tabung perak yang berinding tipis guna melindunginya. Thermometer ini dihubungkan oleh kawat-kawat tembaga merah dengan alat pengukur tahanan yang dapat ditempatkan di mana pun asalkan memudahkan pemakaiannya. Karena tahanan dapat diukur dengan sangat teliti sekali maka thermometer tahanan ini merupakan alat yang paling peka untuk mengukur suhu; telitinya sampai $0,001^{\circ}$ C. Daerah pengukuran thermometer tahanan dari platina mulai dari suhu terendah yang dapat tercapai sampai titik lebur platina yaitu 1760° C.



Gambar 18-3. Rangkaian thermo-elemen.

di dalamnya bila suhu titik hubung A berbeda dengan suhu di titik hubung B. *) Besar kecilnya gaya gerak listrik (ggl) itu bergantung pada beda suhu antara titik hubung yang satu dengan yang lain. Thermo elemen ini dapat dipakai sebagai thermometer dengan cara berikut. Salah satu titik hubung tadi dihubungkan dengan benda yang suhunya akan diukur, sedangkan yang satu lagi ditetapkan suhunya (biasanya 0° C), lalu diukur ggl-nya. Sirkuit thermo elemen biasanya seperti terlukis pada Gambar 18-3(b). Suhu titik hubung B dan C ditetapkan 0° C dengan memasukkannya ke dalam sebuah bejana Dewar berisi es dan air, sedangkan titik hubung A ditempelkan pada benda yang akan diukur suhunya. Ggl yang timbul dapat dibaca pada galvanometer G. Gambar 18-4 memperlihatkan gaya gerak listrik yang

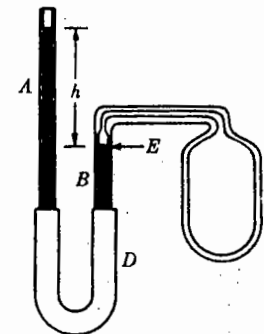
*) Pembicaraan tentang energi elektromotor thermo yang lebih lengkap hendaknya dilihat di dalam sebuah kitab pelajaran mengenai listrik.



Gambar 18-4. Daya elektromotor beberapa thermokoppel yang umum.

ditimbulkan oleh beberapa pasangan logam yang biasa dipakai pada thermo elemen, pada berbagai suhu "titik hubung yang panas" sewaktu "titik hubung yang dingin" suhunya 0° C.

Thermometer gas dengan volum konstan, diperlihatkan pada Gambar 18-5, berdasarkan perubahan tekanan pada volum yang konstan. Ruang C berisi gas, pada umumnya hydrogen atau helium, yang tekanannya dapat diukur dengan ma-



Gambar 18-5. Thermometer gas dengan volum konstan.

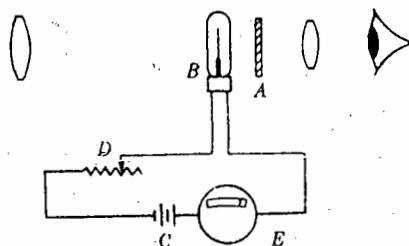
nometer tabung air raksa yang terbuka. Jika suhu gas bertambah, maka gas mengembang dan mendesak air raksa ditabung B ke bawah, sedangkan yang di A ke atas, A dan B dihubungkan oleh pipa karet D yang lemas. Dengan menaikkan A permukaan air raksa di B dapat dikembalikan lagi sampai tanda E. Jadi volum gas tetap konstan. Setiap jenis thermometer, misalnya thermometer zat cair dalam gelas, thermometer gas dapat digunakan untuk menentukan skala suhu manakah yang akan dijadikan dasar. Maksudnya, t° C bagi sesuatu thermometer didefinisikan sebagai suhu yang menimbulkan perubahan fisis yang menjadi dasar thermometer tadi sebesar $t/100$ daripada perubahan fisis yang timbul di antara 0° C dengan 100° C. Skala suhu dari thermometer-thermometer yang berlainan jenisnya berbeda satu sama lainnya. Artinya, thermometer-thermometer zat cair dalam gelas yang berlainan zat cairnya tidak cocok skalanya satu sama lainnya, kecuali pada titik-titik tetapnya 0° C dan 100° C; demikian pula skala thermometer zat cair dalam gelas tidak cocok dengan skala thermometer tahanan, dan begitu seterusnya. Variasi yang paling kecil terdapat di antara thermometer gas yang berisikan gas yang berbeda-beda dan dengan koreksi-koreksi

tertentu, yang pembahasannya berada di luar bidang buku ini, dapatlah semua thermometer gas itu dihilangkan perbedaan-perbedaan tersebut. Selanjutnya dapat pula dibuktikan, bahwa suhu yang sudah dikoreksi demikian itu sesuai dengan skala suhu Kelvin. Selisih antara skala thermometer gas dengan skala yang lain tidaklah besar dan untuk kebanyakan pemakaiannya dapatlah diabaikan. Beberapa harga yang khas dicantumkan di dalam Tabel VIII.

TABEL VIII
THERMOMETER GAS HYDROGEN DENGAN VOLUM KONSTAN
DIBANDINGKAN DENGAN LAIN-LAIN THERMOMETER

Thermometer gas hydrogen dengan volum konstan	Thermometer air raksa di dalam gelas	Thermometer tahanan dari platina	Thermometer dari platina pt-rhodium
0° C	0° C	0° C	0° C
20	20,091	20,240	20,150
40	40,111	40,360	40,297
60	60,086	60,360	60,293
80	80,041	80,240	80,147
100	100	100	100

Pyrometer optik, dilukiskan pada Gambar 18-6, pada hakekatnya terdiri dari sebuah teleskop yang pada tabungnya ditempatkan filter A dari gelas merah dan bola lampu listrik kecil B. Jika pyrometer itu diarahkan ke tungku pembakaran, maka akan terlihat oleh seorang pengamat yang mengintip melalui teleskop itu



Gambar 18-6. Asas pyrometer optik.

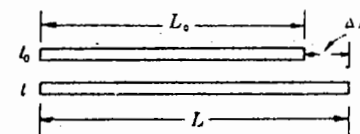
ini pada suhu-suhu yang diketahui, skala ampere meter E dapat diberi angka-angka, sehingga dengan demikian suhu yang belum diketahui dapat dibaca. Karena tidak ada bagian alat ini yang perlu bersinggungan dengan benda panas yang akan diukur, maka pyrometer optik dapat digunakan pada suhu di atas titik lebur dari thermometer tahanan atau thermo-elemen.

Sejumlah besar zat-zat telah diukur titik lebur dan titik didihnya dengan saksama dan telah dibuat tabelnya, dan suhu-suhu ini dapat digunakan untuk menera setiap macam thermometer. Suhu demikian dicantumkan dalam Tabel IX.

TABEL IX
TABEL TITIK-TITIK TETAP

Titik didih hydrogen	-- 252,78° C
Titik didih nitrogen	-- 195,81
Titik beku air raksa	-- 38,87
Titik es	0,00
Titik uap	100,00
Titik didih belerang	444,60
Titik lebur perak	960,5
Titik lebur emas	1063,0

18-5 Pemuai panjang. Ukuran-ukuran semua benda akan bertambah besar, jika suhunya naik. Tetapi ada pula beberapa perkecualiannya. Jika benda itu berwujud batang atau kabel, maka yang menarik perhatian ialah perubahan panjangnya, karena akibat kenaikan suhu tadi. (Perubahan luas penampang lintang demikian kecilnya, hingga dapat diabaikan). Gambar 18-7 melukiskan tongkat yang panjangnya L_0 pada suhu t_0 yaitu suhu pangkal perhitungan Panjangnya pada suhu t , yang lebih tinggi daripada t_0 , ialah L . Selisih $L - L_0 = \Delta L$ ialah besar pemuai panjang karena pemanasan. Dari percobaan terbukti, bahwa tambahan



Gambar 18-7. Pemuai panjang.

panjang ΔL itu berbanding langsung dengan panjang aslinya, yaitu L_0 ; dan hampir-hampir berbanding langsung dengan kenaikan suhu $t - t_0$ atau Δt . Jadi.

$$\Delta L \propto L_0 \Delta t,$$

atau

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta t, \quad (18-1)$$

Di sini α ialah suatu konstante perbandingan, yang berbeda harganya menurut jenis bahan, dan di sebut koefisien muai panjang.

dapat dicari berdasarkan Persamaan (18-1) :

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0} \frac{1}{\Delta t}. \quad (18-2)$$

Sebab itu koefisien muai panjang dapat didefinisikan sebagai perubahan panjang relatif per derajat kenaikan suhu. Hubungan lain yang amat penting dapat diperoleh, yaitu dengan mengganti ΔL dengan $L - L_0$; dan kemudian L dicari:

$$L = L_0(1 + \alpha \Delta t). \quad (18-3)$$

Karena L_0 , L dan ΔL semuanya dinyatakan dengan satuan yang sama, maka satuan α ialah "per derajat" (derajat Celcius atau Fahrenheit). Jadi angka muai panjang tembaga merah dituiis

$$\alpha = 14 \times 10^{-6} \text{ per } ^\circ\text{C} \quad \text{atau} \quad \alpha = 14 \times 10^{-6} (^\circ\text{C}^{-1})$$

Ini berarti, bahwa sebuah batang tembaga merah yang panjangnya 1 cm pada 0°C , bila dipanaskan akan bertambah panjangnya sebesar 0,00014 cm. Sebuah batang yang panjangnya 1 ft pada 0°C , akan bertambah panjangnya dengan 0,00014 ft, begitu seterusnya.

Oleh karena $^\circ\text{F}$ hanya $\frac{5}{9}^\circ\text{C}$, maka angka muai per $^\circ\text{F}$ besarnya $\frac{5}{9}$ dari harganya pada skala Celsius.

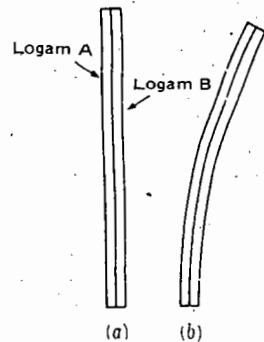
CONTOH. Sebatang pipa besi pada 0°C panjangnya 200 ft. Berapakah tambahan panjangnya, jika dipanasi sampai 100°C . $\alpha = 10 \times 10^{-6} (^\circ\text{C}^{-1})$.

$$L_0 = 200 \text{ ft}; \quad \alpha = 10 \times 10^{-6} (^\circ\text{C}^{-1}); \quad t = 100^\circ\text{C}; \quad t_0 = 0 \text{ C.}$$

$$\begin{aligned} \text{Tambahan panjang} &= \Delta L = \alpha L_0 \Delta t \\ &= (10 \times 10^{-6})(200)(100) \\ &= 0.20 \text{ ft.} \end{aligned}$$

Koefisien muai panjang sesuatu bahan yang berwujud batang dapat ditentukan secara berikut. Dibuat dua gores halus, yang pertama dekat ujungnya, yang kedua dekat pangkalnya. Kemudian suhu batang dinaikkan dengan jumlah yang tertentu, lalu pergeseran tiap-tiap gores tersebut di atas diukur dengan mikroskop pengukur.

Elemen dwi-logam (bimetallic element) ialah suatu alat yang banyak dipakai beberapa tahun yang akhir ini, baik sebagai thermometer maupun sebagai bagian dari banyak alat pengontrol thermostatik. Alat ini terdiri dari dua lempeng logam tipis yang berlainan. Kedua lempeng itu dilas satu sama lainnya atau dikling seperti Gambar 18-8(a). Jika angka muai panjang logam A lebih besar daripada B, lempeng gabungan tersebut, yang pada permulaannya lurus, jika dipanasi akan melengkung seperti Gambar 18-8(b). Gerakan melintang ujung lempeng ini jauh lebih besar daripada tambahan panjang masing-masing logam tersebut.



Gambar. 18-8. Unsur dwi-logam

Jika dipergunakan sebagai thermostat, maka konstruksinya seperti berikut. Ujungnya yang satu tidak bisa bergerak, sedangkan ujungnya yang lain bebas dan gerakannya digunakan untuk menutup atau memutuskan arus listrik pengontrol. Thermometer umum yang digunakan pada tungku berupa lempengan dwi-logam yang berbentuk sulur. Jika suhu berubah, sulur itu akan tambah atau kurang melilitnya dan gerakan ini diteruskan pada penunjuk yang berputar di atas skala yang sudah ditera. Karena adanya gesekan

dan karena makin lama makin berkurangnya gerak sulur tersebut, thermometer semacam ini bukanlah suatu alat presisi.

Jika kedua lempengnya sama tebalnya, misalnya d , terbukti bahwa lempengan dwi-logam yang lurus akan melengkung dan besar radius kelengkungannya ialah:

$$R = R = \frac{d}{\Delta t(\alpha_2 - \alpha_1)}$$

Di sini Δt berarti selang suhu di atas atau di bawah suhu pada waktu lempeng berbentuk lurus; α_1 dan α_2 ialah koefisien muai panjang.

TABEL X
KOEFSIEN MUAI PANJANG

Bahan	$\alpha (^\circ\text{C}^{-1})$
Aluminium	24×10^{-6}
Kuningan	20
Tembaga merah	14
Gelas	4-9
Baja	12
Invar	0,9
Kwarts (leburan)	0,4
Seng	26

TABEL XI
KOEFSIEN MUAI RUANG

Bahan	$\beta (^\circ\text{C}^{-1})$
Alkohol, ethyl	$0,745 \times 10^{-3}$
Disulphida Karbon	1,140
Glycerin	0,485
Air raksa	0,182
Minyak tanah	0,899

18-6 Pemuai luas dan volum. Jika suatu bahan berwujud papan atau lempeng dipanaskan, baik panjang maupun lebar papan itu akan bertambah. Umumakan sebuah papan segi-empat panjang yang waktu suhunya t_0 , panjangnya L_0 dan lebarnya b_0 . Jika dipanaskan hingga suhunya menjadi t , maka ukuran-ukuran ini menjadi:

$$L = L_0 \quad L = L_0(1 + \alpha \Delta t)$$

dan

$$b = b_0 \quad b = b_0(1 + \alpha \Delta t)$$

Luas papan mulanya ialah

$$A_0 = L_0 b_0.$$

Luas sesudah dipanaskan ialah

$$\begin{aligned} A &= Lb = L_0 b_0 (1 + \alpha \Delta t)(1 + \alpha \Delta t) \\ &= A_0 [1 + 2\alpha \Delta t + (\alpha \Delta t)^2]. \end{aligned}$$

Tetapi karena α itu besaran kecil, α^2 akan terlalu kecil sekali, hingga suku $(\alpha \Delta t)^2$ dapat diabaikan. Jadi

$$A = A_0 (1 + 2\alpha \Delta t).$$

Jika sekarang kita mendefinisikan koefisien muai luas γ demikian, hingga:

$$A = A_0 (1 + \gamma \Delta t). \quad (18-4)$$

maka teranglah bahwa

$$\gamma = 2\alpha.$$

Jadi koefisien muai luas besarnya dua kali lipat daripada koefisien muai panjang. Walaupun hubungan di atas dijabarkan khusus untuk papan berbentuk segi-empat panjang, namun tetap berlaku untuk papan berbentuk bagaimanapun.

Jika papan itu berlubang, maka *luas lubang* itu memuai pula sebanding dengan bahan sekelilingnya. Hal ini tetap berlaku walaupun lubang itu menjadi besar sekali, hingga sesungguhnya "papan" tadi berupa suatu cincin mengelilingi lubang tadi. Jadi luas lubang yang dikelilingi oleh bingkai baja roda kereta akan mengembang sebanding dengan mengembangnya piringan yang berukuran sama yang dibuat dari bahan baja yang sama seperti bahan bingkai itu.

Kita tinjau sekarang sebuah balok pijal berbentuk paralelepipedum tegak yang terbuat dari suatu bahan. Pada t_0 ukurannya L_0 , b_0 dan c_0 . Dengan penalaran seperti di atas dapatlah diketahui, bahwa

$$\begin{aligned} V &= V_0 (1 + 3\alpha \Delta t) \\ &= V_0 (1 + \beta \Delta t). \end{aligned} \quad (18-5)$$

V berarti volum pada suhu t dan V_0 volum pada t_0 dan $\beta (= 3\alpha)$ ialah koefisien volum atau koefisien muai ruang (cubical coefficient of expansion). Persamaan ini tetap berlaku, bagaimanapun juga bentuk bendanya.

Begitu pula, ruang yang dilingkungi oleh bahan padat, misalnya volum tangki, botol atau bola thermometer, juga mengembang sebanding seolah-olah berupa benda pejal dari bahan yang sama dengan bahan dindingnya.

Persamaan (18-5) dapat pula digunakan untuk menghitung pemuai zat cair. Koefisien muai panjang dan luas suatu zat tidak penting artinya.

CONTOH. Pada 0°C volum bola thermometer air raksa sama dengan V_0 dan luas penampang pipa kapilernya A_0 . Koefisien muai panjang gelas itu ialah α_G per $^\circ \text{C}$ dan koefisien muai ruang air raksa ialah β_M per $^\circ \text{C}$. Jika pada 0°C air raksa itu tepat memenuhi bola, maka berapakah panjang kolom air raksa di dalam pipa kapiler, jika suhu menjadi $t^\circ \text{C}$?

Volum bola pada suhu $t^\circ \text{C}$ ialah

$$V = V_0 (1 + \beta_G t).$$

Di sini $\beta_G = 3\alpha_G$, yaitu koefisien muai ruang gelas.

Volum air raksa pada suhu t ialah

$$V_M = V_0 (1 + \beta_M t).$$

Volum air raksa yang dikeluarkan dari bola sama dengan selisih keduanya, atau

$$V_0 (1 + \beta_M t) - V_0 (1 + \beta_G t) = V_0 t (\beta_M - \beta_G).$$

Volum ini sama pula dengan kolom air raksa sepanjang l dikalikan dengan luas penampang kapiler A . Harga A ialah

$$A = A_0 (1 + 2\alpha_G t).$$

Tabel X menunjukkan, bahwa koefisien muai panjang gelas ialah 5×10^{-6} per $^\circ \text{C}$. Walaupun t sebesar 300°C , suku $2\alpha_G t$ hanyalah 0,003. Karena itu dapat diabaikan terhadap satu, yang sama artinya dengan menganggap luas penampang lintang pipa kapiler itu konstan. Jadi

$$l A_0 = V_0 t (\beta_M - \beta_G),$$

dan

$$l = \frac{V_0}{A_0} (\beta_M - \beta_G) t.$$

Jadi panjang kolom air raksa itu berbanding langsung dengan suhu dan selisih antara koefisien muai ruang air raksa dan bahan gelas thermometer tersebut.

Dalam daerah suhu antara 0°C dan 4°C , volum air *berkurang* menurut naiknya suhu, jadi, kebalikan dari sifat kebanyakan substansi. Artinya, antara 0°C dan 4°C koefisien muai air adalah *negatif*. Di atas 4°C , air akan mengembang jika dipanaskan. Karena volum dari massa tertentu air pada 4°C lebih kecil daripada volumnya pada suhu lainnya, maka kerapatannya adalah maksimum pada 4°C itu. Sifat air seperti inilah yang menyebabkan mengapa telaga dan kolam membeku lebih dahulu pada permukaannya. Efek ini akan dibahas dalam Bab 20. Tabel XII memperlihatkan pemuai air yang ganjil itu.

TABEL XII
RAPAT DAN VOLUM AIR

$t^\circ \text{C}$	rapat (gm/cc)	Volum 1 gram, dinyatakan dengan cm^3
0	0,99987	1,00013
2	0,99937	1,00003
4	1,00000	1,00000
6	0,99957	1,00003
10	0,9997	1,00027
20	0,99823	1,00177
50	0,98807	1,01207
75	0,97489	1,02576
100	0,95838	1,04343

18-7 *Stress termik*. Jika ujung-ujung sebuah batang dijepitkan dengan kuat-kuat untuk menghalangi pemuaian maupun penyusutan lalu suhunya dirubah, maka dalam batang itu timbul *stress regangan* atau *stress desakan* yang disebut *stress termik*. *Stress* ini dapat menjadi besar sekali, cukup untuk meregangkan batang hingga melampaui batas kelentingannya, bahkan dapat melebihi kekuatan patahnya pula. Jadi pada waktu mengkonstruksi bangunan yang akan menderita perubahan suhu, umumnya haruslah diadakan suatu penjagaan terhadap pemuaian ini. Pada pipa uap yang panjang hal ini dilakukan dengan memasang hubungan dilatasi atau potongan pipa yang berbentuk *U*. Pada jembatan, ujung yang satu dapat dipasangkan dengan kuat-kuat pada landasan, sedangkan ujung lainnya diletakkan di atas roller.

Untuk menghitung tegangan termik yang timbul di dalam batang yang ujung-ujungnya tidak bebas, tidaklah merupakan hal yang sulit. Andaikan pada suhu t sebuah batang ujung-ujungnya dijepitkan dengan kuat-kuat, lalu suhu diturunkan hingga menjadi t_0 .

Jika seandainya batang itu dapat menyusut dengan bebas, maka perubahan panjang relatifnya akan sebesar

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha(t - t_0) = \alpha \Delta t. \quad (18-6)$$

Karena batang tersebut tidak bebas menyusut, maka tegangan itu seharusnya bertambah dengan sejumlah yang cukup untuk menimbulkan perubahan panjang relatif itu. Tetapi berdasarkan definisi umum modulus Young (lihat halaman 242),

$$Y = \frac{\Delta F/A}{\Delta L/L_0},$$

dan sebab itu

$$\Delta F = AY \frac{\Delta L}{L_0}.$$

Dengan mempergunakan harga $\frac{\Delta L}{L_0}$ dari Persamaan (18-6) kita peroleh

$$\Delta F = AY\alpha \Delta t, \quad (18-7)$$

yang menunjukkan tambahan gaya tegangan. Jadi tambahan *stress*

$$\frac{\Delta F}{A} = Y\alpha \Delta t. \quad (18-8)$$

18-1(a). Sebutkanlah titik lebur perak dengan derajat Fahrenheit. (lihat Tabel IX) (b). Berapakah koefisien muai panjang tembaga merah dengan $(F^\circ)^{-1}$? (c). Berapakah koefisien muai ruang tembaga merah dengan $(C^\circ)^{-1}$? (d). Pada suhu berapakah penunjukan dengan skala Fahrenheit sama dengan penunjukan skala Celsius?

18-2. Sebuah batang meteran tepat betul pada $0^\circ C$ sedangkan sebuah lagi, kalau suhunya $25^\circ C$. Berapakah selisih panjang antara keduanya pada $20^\circ C$?

18-3. Panjang suatu jembatan kira-kira 2000 ft. Berapakah selisih panjangnya pada suatu hari dalam musim dingin waktu suhu $-20^\circ F$ dengan panjang pada suatu hari dalam musim panas ketika suhu $100^\circ F$? Gunakanlah koefisien muai baja!

18-4. Suatu meteran pita baja untuk geodesi panjangnya 100 ft. Ukuran ini betul kalau suhu $65^\circ F$. Pada suatu hari ketika suhu $95^\circ F$, jarak antara dua titik diukur dengan pita ini, dan ternyata sama dengan 86,57 ft. Berapakah jarak sesungguhnya antara kedua titik ini?

18-5. Agar dapat terjamin adanya hubungan yang kuat, maka paku keling aluminium yang digunakan pada konstruksi pesawat terbang diameternya lebih besar sedikit daripada diameter lubangnya, lalu didinginkan dengan "es kering" (CO_2 padat) sebelum dimasukkan. Jika diameter lubangnya 0,2500 in, maka berapakah diameter paku keling pada $20^\circ C$, jika diameter paku ini akan sama dengan diameter lubangnya, bila paku didinginkan sampai $-78^\circ C$, yaitu suhu es kering tadi?

18-6. (a). Pada $20^\circ C$ diameter dalam sebuah cincin baja 3,000 in. dan diameter sebuah gandar 3,002 in. Sampai suhu berapakah cincin baja harus dipanasi agar tepat dapat dimasuki gandar? (b). Andaikan cincin dan gandar itu sama-sama didinginkan dengan suatu cara, misalnya dengan udara cair, pada suhu berapakah cincin dapat tepat lepas dari gandar?

18-7. Sehelai kawat yang panjangnya 60 cm dibengkokkan menjadi cincin, tetapi ujung-ujungnya tidak sampai bertemu dan

terpisah sejauh 1,00 cm. Suhu kawat itu secara merata ditambah dengan $100^\circ C$. Pada suhu yang baru ini ternyata pemisahan ujung-ujung itu menjadi 1,002 cm. Berapakah koefisien muai panjang kawat itu? Andaikan di dalam kawatnya tidak ada stress, baik sebelum maupun sesudah dipanaskan.

18-8. Sebuah botol yang pada $0^\circ C$ volumenya 1000 cc diisi dengan air raksa sampai penuh. Lalu botol serta air raksanya dipanaskan hingga suhunya menjadi $100^\circ C$. Ternyata ada 15,2 cc air yang tumpah. Jika koefisien muai ruang air raksa itu 0,000182 $(C^\circ)^{-1}$, hitunglah koefisien muai panjang gelas!

18-9. Sebuah bejana gelas yang tertutup diisi dengan air raksa sebahagian saja, lalu ruang di atas air raksa dihampakan. Kemudian seluruh sistem ini dipanaskan, akan tetapi ternyata bahwa bahagian yang ditempati oleh air raksa diperbandingkan dengan ruang seluruhnya tetap besarnya. Berapa bahagian dari volum seluruhnyakah yang ditempati air raksa pada permulaannya? Koefisien muai ruang gelas $2,5 \times 10^{-5}$ per C° .

18-10. Sebuah ayunan matematik terdiri dari sebuah benang halus dari baja dan bola kuningan kecil. Pada suatu tempat di permukaan bumi di mana $g = 980,00 \text{ cm/det}^2$ dan suhunya $27^\circ C$, periode getarnya lalu diukur. Kemudian ayunan ini dibawa ke tempat yang letaknya 8 km lebih tinggi dari tempat yang pertama. Berapakah suhu tempat yang baru ini, kalau periode getarnya tetap seperti semula? (Perubahan kecil di-dekati dengan differensial).

18-11. Sebuah jam, yang ayunannya melakukan satu getaran sempurna dalam 2 detik, jalannya betul jika suhu $25^\circ C$. Batang ayunan ini terbuat dari baja dan momen kelebamannya dapat diabaikan terhadap momen kelembaman bandulnya. (a). Berapa perubahan panjang relatif dari batang ayunan jika suhu menjadi $15^\circ C$? (b). Setiap harinya jam ini akan terlambat atau terlalu cepat dengan berapa detikkah, jika suhunya $15^\circ C$?

18-12. Sebuah jam yang mempunyai roda imbalan berupa cincin kuningan menunjukkan waktu yang tepat jika suhunya