



MODUL KIMIA DASAR ANORGANIK  
KES 202 (KJ010)

Materi Pertemuan 12  
Konsep Dasar Termodinamika 2

Disusun Oleh:  
Reza Fadhillah, S.TP., M.Si

UNIVERSITAS ESA UNGGUL  
2018

## Kesetimbangan Termal dan Hukum ke Nol Termodinamika

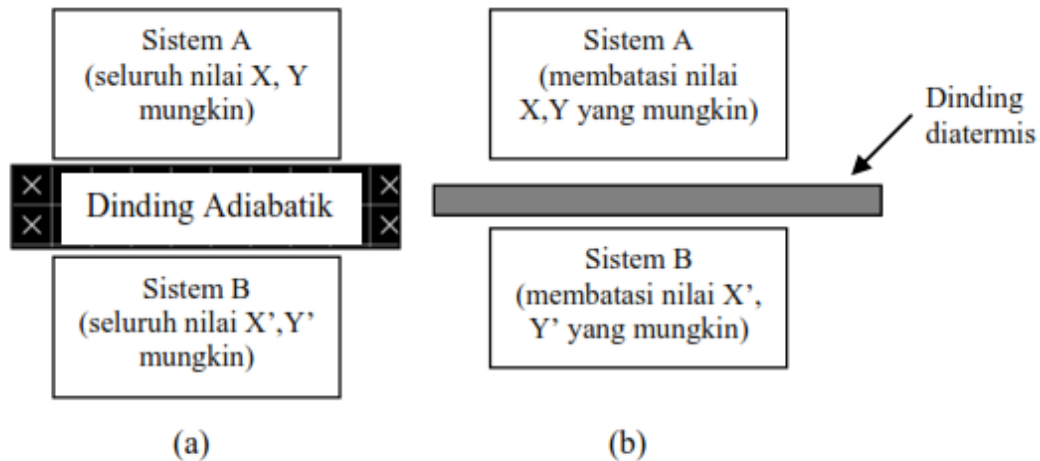
### A. KESETIMBANGAN TERMAL

Beberapa percobaan telah membuktikan bahwa untuk setiap komposisi yang diberikan dengan massa dan temperatur yang konstan, memungkinkan diperoleh harga tekanan dan volume yang berbeda-beda untuk gas. Jika tekanan dijaga tetap, maka nilai volume akan bervariasi dan memiliki kisaran nilai yang lebar. Dengan kata lain tekanan dan volume adalah koordinat bebas akan tetapi dapat dihubungkan dengan persamaan sederhana yang disebut dengan hukum Boyle. Baru-baru ini, percobaan telah menunjukkan bahwa untuk kawat dengan massa tetap, tegangan dan panjang merupakan koordinat yang bebas, seperti halnya pada kasus permukaan lapisan tipis, tegangan permukaan dan luasan akan bervariasi secara bebas pula.

Beberapa sistem yang awalnya kelihatan sangat kompleks, seperti sel listrik dengan dua elektroda yang berbeda dan elektrolit, mungkin masih bisa dijelaskan dengan bantuan dua koordinat bebas. Di lain pihak, beberapa sistem termodinamika yang tersusun beberapa bagian yang sama membutuhkan tetapan dua koordinat bebas untuk setiap bagian yang sama. Pembahasan secara rinci tentang sistem termodinamika dan koordinat termodinamika akan dibahas pada bab berikutnya. Sekarang, untuk menyederhanakan diskusi kita, kita hanya menyepakati suatu sistem dengan massa dan komposisi yang tetap, tiap bagiannya hanya membutuhkan satu pasang koordinat bebas sebagai penjelasan dengan tidak meninggalkan arti sesungguhnya untuk menghemat kata-kata.

Untuk menjelaskan sistem lain secara umum, kita tetap menggunakan simbol  $X$  dan  $Y$  untuk pasangan koordinat bebas, di mana simbol  $X$  sebagai gaya umum (misalkan tekanan gas), dan  $Y$  sebagai perpindahan atau perubahan secara umum (misalkan volume gas). Suatu sistem dengan koordinat  $X$  dan  $Y$  memiliki nilai tetap yang berarti konstan selama keadaan luar tidak berubah atau disebut keadaan setimbang. Percobaan telah menunjukkan bahwa adanya keadaan setimbang dalam suatu sistem bergantung pada dekatnya sistem lain dan batas (dinding) yang memisahkan dengan sistem yang berbeda. Dinding dapat bersifat sebagai adiabatik atau diathermis dalam kasus ideal. Jika batasnya adalah adiabatik (lihat Gambar 1.6a) maka keadaan setimbang untuk sistem A akan berdampingan dengan keadaan setimbang dari sistem B untuk semua nilai besaran,  $X, Y$  dan  $X'', Y''$  - tersedia hanya jika batas tersebut mampu bertahan terhadap tegangan berbeda yang diberikan antara dua pasang koordinat tersebut.

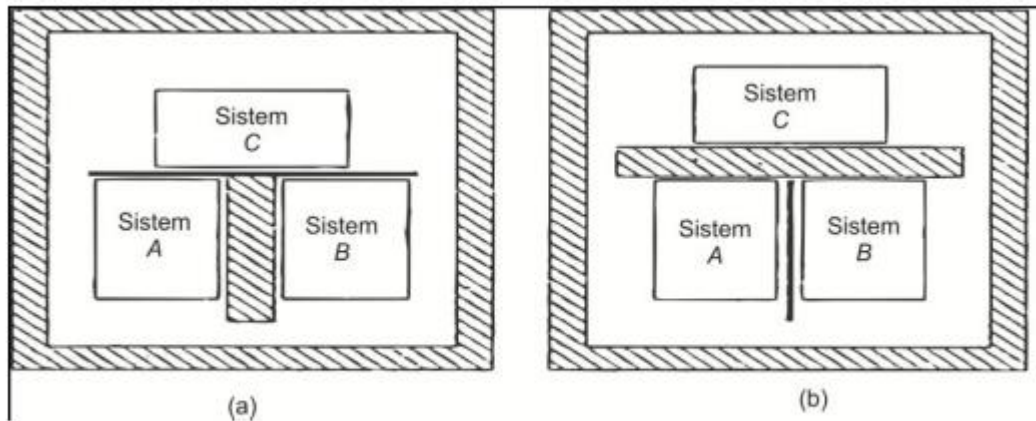
Kayu, beton, asbes atau karet sintetis merupakan cara untuk perbaikan percobaan yang mendekati dinding adiabatik yang ideal. Jika dua sistem dipisahkan oleh dinding diatermis seperti yang ditunjukkan Gambar 1.6b, nilai  $X, Y$  dan  $X'', Y''$  akan berubah secara spontan sampai keadaan setimbang tercapai dari gabungan sistem tersebut. Dua sistem tersebut kemudian dikatakan terjadi kesetimbangan temperatur antara satu dengan yang lain.



Gambar 1.6. Sifat dinding dari (a) adiabatik, (b) diatermis

Dinding diatermis yang umum pada percobaan adalah menggunakan lembaran logam. Perlu dicatat bahwa Kesetimbangan termal merupakan keadaan yang dituju oleh dua sistem atau lebih, yang dicirikan dengan batasan nilai dari koordinat sebuah sistem, setelah terjadi hubungan antara satu dengan yang lain lewat dinding diathermis. Tidak seperti dinding diatermis, dinding adiabatik mencegah adanya hubungan antara satu sistem dengan sistem yang lain dan juga mencegah adanya kesetimbangan temperatur antara keduanya. Meskipun kita belum mendefinisikan konsep tentang panas, mungkin dapat dikatakan bahwa dinding diatermis merupakan suatu pembatas di mana suatu panas dapat berhubungan antara satu sistem dengan sistem yang lain, dengan tidak adanya perpindahan materi. Sedang dinding adiabatik yang ideal tidak menghantarkan panas. Bayangkan dua sistem A dan B, dipisahkan oleh dinding adiabatik akan tetapi masih ada hubungan bersama dengan sistem ketiga, yakni C lewat dinding diatermis, keseluruhan sistem dikelilingi oleh dinding adiabatik sebagaimana dilihat pada Gambar 1.7a. Dalam percobaan menunjukkan bahwa dua sistem akan terjadi kesetimbangan termal dengan sistem ketiga.

Tidak akan terjadi perubahan selanjutnya bila dinding adiabatik yang memisahkan sistem A dan B diganti dengan dinding diatermik, sebagaimana terlihat pada Gambar 1.7b. Jika, kedua sistem A dan B malah terjadi kesetimbangan termal dengan sistem C pada waktu bersamaan, pertama kali yang kita tetapkan adalah kesetimbangan antara A dan C lalu kemudian menetapkan kesetimbangan antara B dan C (keadaan sistem C sama pada kedua kasus); kemudian, ketika A dan B terjadi hubungan melalui dinding diatermik, maka akan terjadi kesetimbangan termal di antara keduanya. Kita tetap menggunakan pernyataan bahwa "dua sistem berada pada kesetimbangan termal" yang berarti juga dua sistem tersebut dalam keadaan di mana jika dua sistem dihubungkan oleh dinding diatermis maka gabungan sistem tersebut akan berada pada kesetimbangan termal.



Gambar 1.7. Hukum termodinamika ke Nol

Fakta eksperimen secara singkat dapat diungkapkan melalui hubungan berikut. Jika dua sistem (A dan B) yang memiliki kesetimbangan termal dengan sistem ketiga (C), maka A dan B berada dalam kesetimbangan termal terhadap satu sama lain. Sebagai mana yang telah dicetuskan oleh Ralph Flower, postulat kesetimbangan termal ini dinyatakan sebagai hukum termodinamika ke nol, yang menetapkan sebagai dasar konsep temperatur dan penggunaan termometer. Postulat tentang kesetimbangan termal dinamakan hukum ke nol, bukannya hukum pertama, karena perkembangan sejarah dalam memahami logika dari hukum termodinamika. Hukum pertama termodinamika, yang membentuk konservasi energi termasuk panas, telah dirumuskan dengan jelas oleh Hermann Helmholtz dan William Thompson pada tahun 1848 (kemudian lord Kelvin) menggunakan data percobaan yang dikumpulkan oleh James Prescott Joule (1843-1849) dan wawasan dari Julius Mayer (1842).

Hukum kedua termodinamika dipostulatkan lebih awal (1824) di Pusat studi Sadi Carnot's yang mempelajari sistem kerja dari mesin uap. Secara logika, prinsip Carnot harus diikuti dengan hukum pertama jika prinsipnya digambarkan sebagai larangan yang berarti di mana energi dapat dihubungkan selama masih konservasi. Sebagaimana postulat termodinamika yang telah berkembang lebih jauh, telah dicetuskan oleh Blower (1931) di mana kesetimbangan termal harus dijelaskan sebelum hukum pertama ditetapkan. Tidak mungkin mengubah deretan nomor dari dua hukum termodinamika yang telah dicetuskan sebelumnya. Dia memaksakan untuk memakai angka nol sebagai nomor hukum yang dibuatnya. Hal ini tidak berarti bahwa pada perkembangan selanjutnya akan ada hukum termodinamika ke minus.

Contoh

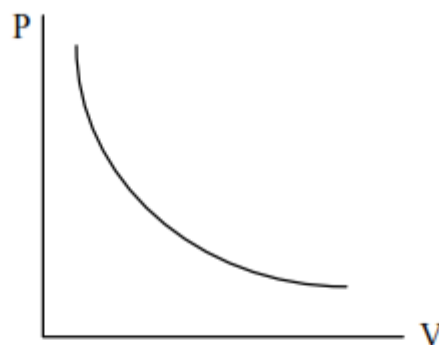
Dapatkah Anda jelaskan tentang hukum Boyle?

Penyelesaian:

Hukum Boyle merupakan hasil eksperimen yang menyatakan bahwa volume gas berbanding terbalik dengan tekanan yang diberikan padanya ketika temperatur dijaga konstan. Secara matematis ditulis:

$$V \propto \frac{1}{P} \text{ atau } PV = \text{konstan}$$

yaitu pada temperatur konstan, jika tekanan ataupun volume gas dibiarkan berubah, variabel yang satunya juga berubah sehingga hasil kali PV tetap konstan. Grafik P terhadap V untuk temperatur konstan ditunjukkan pada Gambar 1.8 berikut ini.



Gambar 1.8. Grafik tekanan vs Volume gas yang dinyatakan oleh hukum Boyle

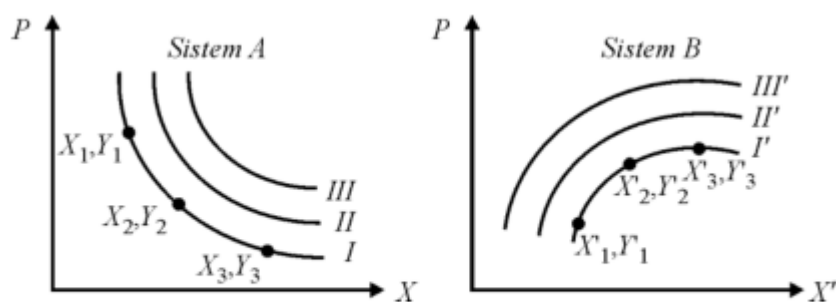
Dalam kesetimbangan termodinamika, selain kesetimbangan termal (temperatur) juga harus memenuhi kesetimbangan mekanik dan kesetimbangan kimia. Artinya kuantitas dalam mekanik maupun kimia juga harus setimbang, contohnya tekanan, gaya, tegangan, konsentrasi dan lain-lain.

## B. KONSEP TEMPERATUR

Ketika Anda disuruh menyentuh batang es, air dan air yang baru saja dipanaskan, maka Anda akan dengan mudah membedakan benda-benda yang panas, hangat atau dingin. Perasaan melalui sentuhan adalah cara yang paling sederhana untuk membedakan benda-benda panas dari benda-benda dingin. Melalui sentuhan, maka kita dapat menyusun benda-benda menurut tingkat kepanasannya, yang memutuskan bahwa Air yang baru saja dipanaskan adalah lebih panas daripada air sebelumnya, air lebih panas daripada batang es dan sebagainya. Kita mengatakan ini sebagai pengertian temperatur. Hal ini adalah merupakan sebuah prosedur yang sanget subjektif untuk menentukan temperatur sebuah benda dan barang tentu tidaklah sangat berguna untuk tujuan-tujuan ilmu pengetahuan.

Secara makroskopis temperatur sebuah gas dapat diukur juga secara operasional dengan menggunakan alat termometer. Dipandang secara mikroskopis, maka temperatur sebuah gas dapat dihubungkan kepada tenaga kinetik rata-rata translasi dari molekul-molekul. Ilmu pengetahuan dalam memahami konsep temperatur dibangun berdasarkan kesetimbangan termal, yang telah dijelaskan pada hukum ke nol termodinamika. Dimisalkan sistem A menempati  $X_1, Y_1$  pada kesetimbangan termal dengan sistem lain B yang menempati  $X_1'', Y_1''$ . Jika sistem A dipindahkan dan keadaannya di rubah maka akan kita dapatkan keadaan kedua yakni  $X_2, Y_2$  yang juga berada pada kesetimbangan termal dengan keadaan awal  $X_1'', Y_1''$  dari sistem B. Dalam percobaan menunjukkan bahwa ada eksistensi satu pasang keadaan  $X_1, Y_1$ ;  $X_2, Y_2$ ;  $X_3, Y_3$  di mana semuanya berada pada kesetimbangan termal dengan keadaan pada  $X_1'', Y_1''$  dari sistem B, dan semuanya juga berada pada kesetimbangan termal antara satu dengan yang lain berdasarkan hukum ke nol. Kita tetap menganggap bahwa semua keadaan, jika di plot pada diagram X-Y, garis pada kurva seperti I pada Gambar 1.9, kita sebut dengan keadaan isothermal.

Isothermal adalah suatu daerah di mana semua titik menggambarkan keadaan sebuah sistem berada pada keadaan kesetimbangan termal dengan keadaan sistem yang lain. Kita tidak mengasumsikan keadaan isothermal kontinu, walaupun percobaan dari sebuah sistem sederhana mengindikasikan adanya kurva isothermal yang kontinu dalam jumlah yang sedikit.



Gambar 1.9. Isothermal dari dua sistem yang berbeda

Dengan cara yang sama, pada sistem B kita temukan suatu keadaan  $X_1'', Y_1''$ ;  $X_2'', Y_2''$ ;  $X_3'', Y_3''$  di mana semuanya berada pada kesetimbangan termal dengan satu keadaan  $(X_1, Y_1)$  dari sistem A, dan juga pada kesetimbangan termal dengan sistem yang lain. Keadaan ini diplot pada diagram  $X''-Y''$  seperti yang ditunjukkan Gambar 1.9 dan garis pada isothermal I". Dari hukum ke nol, diperoleh bahwa seluruh keadaan isothermal I dari sistem A berada pada kesetimbangan termal dengan seluruh keadaan pada isothermal I" dari sistem B. Dengan kata lain kurva I dan I" merupakan isothermal dari dua sistem. Jika percobaan yang sama diulang dengan kondisi awal yang berbeda maka akan kita temukan garis pada kurva II, semua keadaan setimbang dari sistem B digambarkan pada kurva II". Dalam hal ini, mungkin akan ditemukan kumpulan isothermal I, II, III, dan seterusnya dari

sistem A berhubungan dengan kumpulan I", II", III", dan seterusnya dari sistem B.

Selanjutnya, dengan mengulang penerapan hukum ke nol, kita mungkin akan mendapatkan hubungan isothermal antara sistem satu dengan sistem yang lain dalam hal ini sistem C, D, dan sebagainya. Semua keadaan hubungan isothermal dari semua sistem memiliki sesuatu yang bersifat umum dan memiliki satuan, di mana semua sistem memiliki kesetimbangan termal dengan sistem lainnya. Sistem itu sendiri, dalam keadaan ini mungkin dapat dikatakan memiliki sifat yang menjamin sistem tersebut tetap berada pada kesetimbangan termal dengan sistem lainnya. Kita biasa menyebut dengan variabel temperatur. Temperatur sistem merupakan sifat yang menentukan sistem tersebut memiliki atau tidak memiliki kesetimbangan termal dengan sistem lainnya. Sifat skalar dari suatu temperatur telah dijelaskan pada hukum ke nol termodinamika. Untuk sistem A dan B yang mencapai kesetimbangan termal maka diperlukan informasi yang menyatakan bahwa kedua sistem tersebut juga memiliki kesetimbangan termal dengan sistem ketiga C. Namun, hal ini tidaklah benar, sebagai contoh pada kesetimbangan mekanik dari sebuah padatan kristalin yang bersifat elastis, tensor dari tegangan terdapat pada dua bagian dari kristal tersebut, hal ini berarti dua bagian tersebut tidaklah dibutuhkan untuk mencapai kesetimbangan mekanik dengan sistem lainnya, karena setiap bagian dari kristalin tersebut memiliki kesetimbangan sendiri dengan sistem lainnya.

Sejak kita ketahui bahwa temperatur merupakan besaran skalar makatemperatur dari semua sistem dalam keadaan setimbang digambarkan sebagai sebuah nilai. Pencetusan skala temperatur merupakan pengambilan dari sebuah aturan lengkap untuk menandai satu nilai pada hubungan isothermal, dan nilai berbeda untuk menandai hubungan isothermal yang lain. Jika ini telah dilakukan, maka kondisi yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi kesetimbangan termal antara dua sistem adalah bahwa keduanya memiliki temperatur yang sama. Juga dapat kita pastikan jika dua sistem tersebut memiliki temperatur yang berbeda, maka dua sistem tersebut dikatakan tidak mencapai kesetimbangan termal.

Untuk menentukannya atau tidaknya dua gelas air pada keadaan setimbang, tidaklah perlu menghubungkan dua gelas tersebut dengan dinding diatermis dan melihat perubahan sifatnya seiring dengan waktu. Lebih baik, pipa kapilar yang diisi air raksa (sistem A) dimasukkan ke dalam gelas pertama (sistem B) dan beberapa sifatnya, seperti tinggi, dari kolom air raksa menjadi diam. Kemudian, dengan definisi seperti di atas, alat ini memiliki temperatur yang sama dengan temperatur gelas pertama. Dengan mengulangi prosedur yang sama pada gelas yang lain (sistem C), jika tinggi kolom air raksa sama makatemperatur B dan C adalah sama. Selanjutnya, percobaan menunjukkan bahwa jika dua gelas sekarang dihubungkan, maka tidak ada perubahan dari sifatnya. Sebagai catatan, pipa kapiler yang berisi air raksa tidak membutuhkan skala; yang dibutuhkan hanyalah tinggi kolom air raksa antara dua spesimen haruslah sama. Alat ini disebut thermoscope, yang hanya dapat mengindikasikan kesamaan temperatur untuk menunjukkan kesetimbangan termal sebuah sistem. Selanjutnya untuk mengetahui secara kuantitas pengukuran temperatur, kita harus melakukan sistem percobaan yang standar.

Pengungkapan yang lebih formal, tetapi barangkali lebih fundamental mengenai hukum ke nol adalah: terdapat sebuah kuantitas skalar yang dinamakan temperatur, yang merupakan sebuah sifat semua sistem termodinamika (di dalam keadaan-keadaan kesetimbangan), sehingga kesamaan temperatur adalah merupakan syarat yang perlu dan cukup untuk kesetimbangan termal.

#### Contoh

Mengapa kita menggunakan pipa kapiler yang berisi air raksa untuk menentukan kesetimbangan termal dari dua gelas yang berisi air?

#### Penyelesaian:

Air raksa sangat peka terhadap perubahan temperatur, di mana semakin tinggi temperatur, maka air raksa semakin cepat memuainya. Pada pipa kapiler yang berisi air raksa, zat cair ini akan memuai lebih banyak dari pipanya ketika temperatur naik, sehingga ketinggian air raksa naik dalam pipa.

### C. PENENTUAN KUANTITATIF SKALA TEMPERATUR

Untuk menentukan sebuah skala temperatur secara empirik, kita memilih beberapa sistem dengan koordinat X dan Y sebagai standar, yang kita sebut sebagai termometer dan mengambil satu rangkaian aturan untuk menentukan sebuah hasil numerik bagi kumpulan temperatur dengan isotermlnya masing-masing. Untuk setiap sistem keseimbangan termal yang lain pada termometer, kita menentukan angka yang sama untuk temperatur. Prosedur gampangnya adalah dengan memilih garis yang tepat pada bidang X-Y, misalnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.10 dengan garis putus-putus  $Y=Y_1$ , yang memotong garis isoterml pada tiap titik yang memiliki koordinat yang sama tetapi koordinat X-nya berbeda. Kumpulan temperatur dengan masing-masing isoterml kemudian menentukan fungsi X pada titik yang berpotongan ini. Koordinat X disebut sifat termometrik dan bentuk dari fungsi termometrik  $\Theta(X)$  menentukan skala empirik temperatur. Ada banyak jenis termometer yang berbeda, dengan sifatnya masing-masing, dan 6 termometer modern ditunjukkan pada Tabel 1.3.

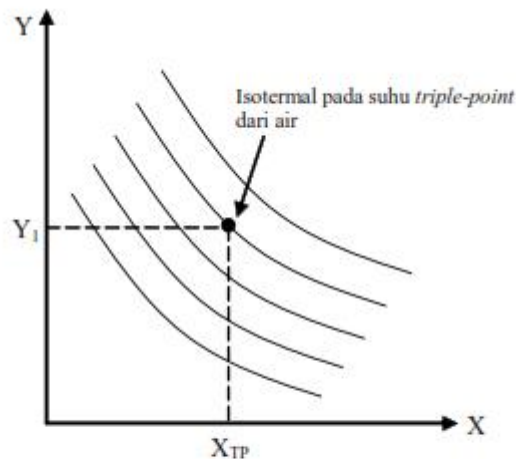
Misalkan X merupakan komponen untuk setiap daftar sifat termometrik pada Tabel 1.3 dan mari tentukan untuk mendefinisikan skala temperature sehingga temperatur empirik  $\Theta$  berbanding lurus dengan X. Pilihan keputusan dari fungsi linear ini mempertahankan skala temperatur yang pertama digunakan pada sejarah termometer air raksa dalam tabung kaca. Dengan demikian, keadaan umum temperatur pada termometer untuk semua sistem pada keseimbangan termal dapat diperoleh dari fungsi thermometrik, yakni:

$$\theta(X) = a X \quad (Y \text{ konstan}) \quad (1.3)$$

di mana a konstanta sembarang. Ingat bahwa jika koordinat X mendekati 0,



temperatur selalu mendekati 0, karena tidak ada konstanta yang ditambahkan pada fungsi tersebut. Sebagai akibatnya, fungsi linear pada persamaan (1.3) juga menetapkan skala temperatur absolut, seperti skala Kelvin atau skala Rankine.



Gambar 1.10. Pengaturan skala temperatur yang meliputi penentuan nilai numerik pada isotermal dari sistem standar yang dipilih (termometer)

Tabel 1.3 Termometer dan sifat termometriknya

| Termometer           | Sifat termometrik      | Simbol        |
|----------------------|------------------------|---------------|
| Gas (volume konstan) | Tekanan                | P             |
| Tahanan platinum     | Resistansi listrik     | R             |
| Termokopel           | EMF termal             | $\varepsilon$ |
| Helium cair          | Tekanan                | P             |
| Garam paramagnetik   | Susepibilitas magnetik | $\chi$        |
| Radiasi benda hitam  | Eksitansi radian       | $R_{bb}$      |

Dengan memilih bentuk linear untuk  $\Theta(X)$ , maka kita telah menetapkan bentuk tersebut sehingga menyamai perbedaan-perbedaan temperatur, atau interval-interval temperatur, yang menyatakan perubahan X. Hal ini berarti misalnya bahwa setiap kali kolom air raksa di dalam termometer air raksa dalam gelas berubah panjangnya sebesar satu satuan maka temperatur berubah sejumlah tetap yang tertentu, tak peduli betapapun temperatur awal. Juga didapatkan dari sini bahwa dua temperatur yang diukur dengan termometer yang sama, berada di dalam perbandingan yang sama seperti perbandingan X-nya yang bersangkutan, yakni:

$$\frac{\theta(X_1)}{\theta(X_2)} = \frac{X_1}{X_2} \quad (1.4)$$

Untuk menentukan konstanta  $a$ , yakni mengkalibrasi termometer tersebut, maka menentukan sebuah titik tetap standar di mana semua termometer harus memberikan pembacaan yang sama untuk temperatur  $\Theta$ . Titik tetap ini dipilih merupakan titik di mana es, air cair dan uap air berada bersama-sama di dalam kesetimbangan dan dinamakan titik tripel air (triple point of water). Keadaan ini hanya dapat dicapai pada tekanan tertentu dan keadaan ini adalah unik, seperti yang terlihat pada Gambar 1.11. tekanan uap air pada titik tripel adalah 4.58 mm-Hg.

Temperatur pada titik tetap standar ini ditetapkan secara sembarang pada 273,16 derajat Kelvin atau disingkat 273,16 K. Kelak, nama kelvin (simbol K) menggantikan derajat Kelvin (simbol K) dan satuan temperatur termodinamika didefinisikan sebagai berikut: Kelvin, yakni satuan temperatur termodinamika adalah pecahan  $1/273,16$  dari temperatur termodinamika titik tripel air. Jika kita menunjukkan nilai-nilai pada titik tripel dengan menggunakan indeks bawah TP, maka untuk setiap termometer berlaku:

$$\frac{\theta(X)}{\theta(X_{TP})} = \frac{X}{X_{TP}} \quad (1.5)$$

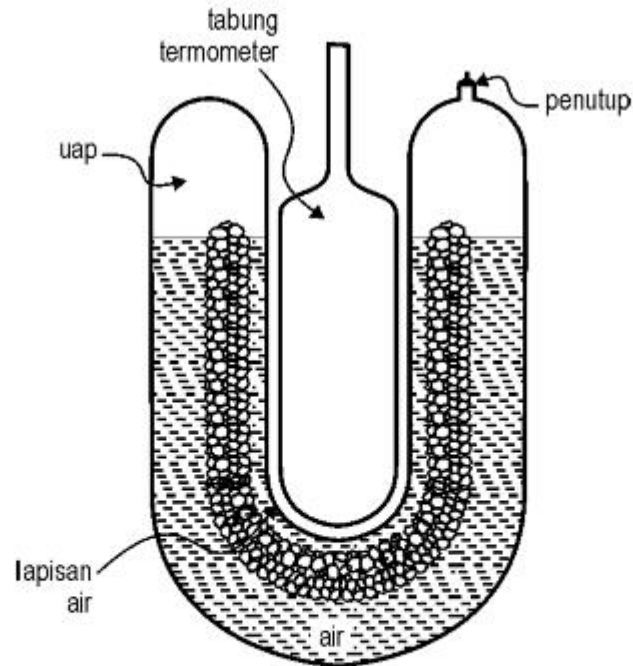
di mana untuk semua termometer,

$$\theta(X_{TP}) = 273,16 \text{ K} \quad (1.6)$$

sehingga;

$$\theta(X) = 273,16 \text{ K} \frac{X}{X_{TP}} \quad (1.7)$$

Bila sifat termometrik mempunyai nilai  $X$  maka temperatur  $\theta$ , pada skala pribadi khas yang dipilih, diberikan di dalam K oleh  $\theta(X)$ , bila nilai  $X$  dan  $X_{TP}$  disisipkan ke ruas kanan persamaan ini.



Gambar 1.11. Sel titik *tripel* *National Bureau of standards*. Sel tersebut mengandung air murni dan disegel (tutup) setelah udaranya dikeluarkan. Kemudian sel tersebut dicelupkan di dalam bak air es. Sistem tersebut berada pada titik-titik *tripel* bila es, air dan uap semuanya ada, dan di dalam kesetimbangan di dalam sel tersebut. Termometer yang akan dikalibrasi dicelupkan di dalam sumur tengah.

Kita sekarang dapat memakai persamaan (1.7) kepada beberapa termometer. Untuk sebuah termometer cairan di dalam gelas, maka  $X$  adalah  $L$ , yakni panjang kolom cairan dan persamaan (1.7) menghasilkan:

$$\theta(L) = 273,16 \text{ K} \frac{L}{L_{TP}} \quad (1.8)$$

Untuk sebuah gas pada tekanan konstan,  $X$  adalah  $V$  yakni volume gas dan

$$\theta(V) = 273,16 \text{ K} \frac{V}{V_{TP}} \quad (P \text{ konstan}) \quad (1.9)$$

Untuk sebuah gas pada volume konstan,  $X$  adalah  $P$ , yakni tekanan gas dan

$$\theta(P) = 273,16 \text{ K} \frac{P}{P_{TP}} \quad (V \text{ Konstan}) \quad (1.10)$$

Untuk sebuah termometer hambatan platina,  $X$  adalah  $R$ , yakni hambatan listrik, dan

$$\theta(R) = 273,16 \text{ K} \frac{R}{R_{TP}} \quad (1.11)$$

serupa halnya untuk zat-zat termometrik dan sifat-sifat termometerik yang lain. Pertanyaan sekarang timbul, apakah nilai yang kita dapatkan untuk temperatur sebuah sistem bergantung pada pemilihan termometer yang kita gunakan untuk mengukur temperatur tersebut? Kita telah menjamin berdasarkan definisi bahwa semua jenis termometer yang berbeda-beda akan sesuai satu sama lain pada titik tetap standar, tetapi apa yang terjadi pada titik-titik lain? Kita dapat membayangkan sederet pengujian di mana temperatur sebuah sistem yang diberikan diukur pada waktu bersamaan dengan banyak termometer yang berbeda-beda. Hasil-hasil pengujian seperti itu memperlihatkan bahwa termometer-termometer tersebut semuanya menunjukkan pembacaan yang berbeda-beda.

Malah bila digunakan termometer-termometer yang berbeda-beda dari jenis yang sama pun, seperti termometer gas volume konstan yang menggunakan gas yang berbeda-beda, maka kita mendapatkan pembacaan temperatur yang berbeda-beda untuk sebuah sistem yang diberikan di dalam sebuah keadaan yang diberikan. Maka, untuk mendapatkan sebuah skala temperatur yang tetap, kita harus memilih satu jenis termometer sebagai standar. Pemilihan tersebut akan dibuat, bukan berdasarkan kemudahan eksperimental tetapi dengan menyelidiki apakah skala temperatur yang didefinisikan oleh sebuah termometer khas terbukti merupakan sebuah kuantitas yang berguna di dalam perumusan hukum-hukum fisika. Variasi terkecil di dalam pembacaan ditemukan di antara termometer-termometer gas volume konstan yang berbeda-beda, yang menyarankan bahwa kita memilih sebuah gas sebagai zat termometrik standar.

Ternyata bahwa jika banyaknya gas yang digunakan di dalam termometer seperti itu, yang berarti juga tekanannya direduksi, maka variasi pembacaan di antara termometer-termometer gas yang menggunakan jenis gas yang berbeda-beda akan direduksi pula. Jadi, kelihatannya ada sesuatu yang mendasar mengenai sifat termometer volume konstan yang berisi gas pada tekanan rendah.

### *Contoh*

Sebuah termometer hambatan platina tertentu mempunyai hambatan  $R$  sebesar  $90,35 \Omega$  bila ujung termometer ditempatkan di dalam sebuah sel titik tripel, seperti sel dalam Gambar 1.11. Temperatur berapakah yang didefinisikan oleh persamaan (1.11) jika ujung tersebut ditempatkan di dalam sebuah lingkungan sehingga hambatannya adalah  $96,28 \Omega$ ?

*Penyelesaian:*

Dari persamaan (1.11),

$$\theta(R) = 273,16 \text{ K} \frac{R}{R_{TP}} = 273,16 \text{ K} \left( \frac{96,28}{90,35} \right) = 280,6 \text{ K}$$

Perhatikan bahwa temperatur ini adalah sebuah skala pribadi, yang didefinisikan dengan memakai persamaan (1.7) kepada sebuah alat khas, yakni termometer hambatan platina

Contoh

Sebuah termometer gas pada volume konstan mempunyai tekanan 133,32 kPa ketika ditempatkan di dalam sebuah sel titik tripel. Berapakah temperatur jika ujung tersebut ditempatkan di dalam sebuah lingkungan sehingga tekanannya menjadi 204,69 kPa?

*Penyelesaian:*

Dari persamaan (1.10) diperoleh,

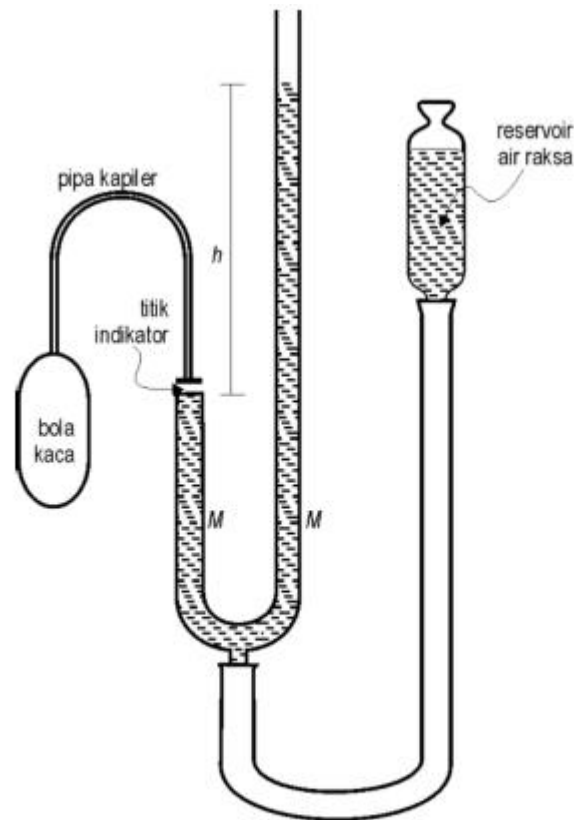
$$\theta(P) = 273,16 \text{ K} \frac{P}{P_{TP}} = 273,16 \text{ K} \left( \frac{204,69 \text{ kPa}}{133,32 \text{ kPa}} \right) = 419,39 \text{ K}$$

Jadi, temperatur sel titik tripel yang ujungnya ditempatkan dalam sebuah lingkungan yang tekanannya berubah dari 133,320 kPa menjadi 204,69 kPa adalah sebesar 419,39 K.

#### D. TERMOMETER GAS VOLUME KONSTAN

Jika volume sebuah gas dibuat konstan, maka tekanannya bergantung pada temperatur dan akan terus menerus bertambah besar dengan kenaikan temperatur. Termometer gas volume konstan menggunakan tekanan pada volume konstan sebagai sifat termometrik. Diagram skematik sederhana dari volume konstan termometer gas ditunjukkan pada Gambar 1.12. Bahan, konstruksi dan dimensi berbeda pada tiap jenis laboratorium di seluruh dunia, di mana instrumen ini digunakan dan bergantung pada keadaan alami gas dan tingkat temperatur yang diinginkan.

Gas diisikan ke dalam bola kaca B, yang berhubungan dengan kolom kapiler air raksa M. Volume gas dijaga konstan dengan mengatur tinggi kolom air raksa M hingga air raksa menyentuh ujung kecil tongkat penunjuk (titik indikator) di atas M, dikenal sebagai area mati atau gangguan isi. Air raksa di kolom M bisa naik atau turun pada reservoir. Tekanan pada sistem sama dengan tekanan atmosfer ditambah dengan perbedaan ketinggian  $h$  antara dua air raksa di kolom M dan M' dan diukur dua kali : ketika bola kaca dikelilingi oleh sistem yang temperaturnya akan diukur, dan ketika dikelilingi air pada titik tripel.



Gambar 1.12. Termometer gas dengan volume konstan yang sederhana. Reservoir air raksa naik atau turun, karena itu *meniscus* di sisi kiri selalu

menyentuh titik indikator. Tekanan di bola kaca sama dengan  $h +$  tekanan atmosfer.

Di dalam prakteknya alat tersebut adalah sangat rumit dan kita harus membuat banyak koreksi, misalnya (1) membolehkan perubahan volume yang kecil karena terjadinya sedikit penyusutan (kontraksi) atau ekspansi bola gelas dan (2) membolehkan kenyataan bahwa tidak semuanya gas yang dibatasi tersebut (seperti gas di dalam kapiler) telah dicelupkan di dalam benda yang akan diukur. Kemajuan dan cara alternatif untuk mengukur tekanan telah dimasukkan ke dalam desain termometer gas, karena itu kesalahan dapat diperkirakan dan dihapus dari data. Sebagai hasil, sifat gas yang nyata mendekati sifat dari gas ideal pada kondisi yang terbatas.

## E. TEMPERATUR GAS IDEAL

Pada abad ke-19, tidak ada termometer yang dapat dibandingkan dengan keefektifan termometer gas. Hal ini diadopsi secara resmi oleh Komite Berat dan Ukuran Internasional pada tahun 1887 sebagai termometer standar untuk menggantikan termometer air raksa dalam tabung kaca. Teori ini didasarkan pada termometri gas yang kemudian menjadi hubungan yang dapat dipahami antara tekanan, volume dan temperatur yang menjadi hukum gas ideal, yakni

$$PV = nRT \quad (1.12)$$

Di mana  $P$  adalah tekanan sistem gas,  $V$  adalah volume gas,  $n$  adalah jumlah mol gas dan  $R$  adalah konstanta molar gas, serta  $T$  adalah Temperatur gas ideal. Pada bagian ini, kita akan menunjukkan eksperimen yang hasilnya dapat diulang kembali dan temperatur empirik  $\theta$  yang akurat. Huruf Yunani theta ( $\theta$ ) menunjukkan temperatur gas yang sesungguhnya dan  $T$  menunjukkan temperatur gas ideal termodinamika. Temperatur gas ideal didapatkan dengan menggunakan termometer gas volume konstan. Menerapkan persamaan (1.10) mula-mula pada gas yang temperaturnya ditetapkan 273,16 K dan kemudian pada gas dengan temperatur empirik yang tidak diketahui, yang nantinya akan didapatkan dengan persamaan tersebut. Kita anggap pengukuran temperatur gas ideal pada saat titik didih normal (NBP) air (titik uap). Jumlah gas dimaksudkan pada bola kaca termometer gas volume konstan, dan mengukur  $P_{TP}$  ketika bola kaca termometer volume konstan dimasukkan ke titik tripel yang ditunjukkan pada

Gambar 1.12. Andaikata  $P_{TP}$  sama dengan 120 kPa. Untuk menjaga volume  $V$  konstan maka langkah-langkah prosedur yang harus dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Meletakkan bola kaca dengan uap air pada tekanan atmosfer standar, mengukur tekanan gas  $P_{NBP}$ , dan menghitung temperatur  $\theta$  empirik menggunakan persamaan (1.10).

$$\theta(P_{NBP}) = 273,16 \text{ K} \frac{P_{NBP}}{120}$$

2. Membuang beberapa gas sehingga  $P_{TP}$  berkurang, katakan, 60 kPa. Mengukur hasil baru dari  $P_{NBP}$  dan menghitung temperatur barunya.

$$\theta(P_{NBP}) = 273,16 \text{ K} \frac{P_{NBP}}{60}$$

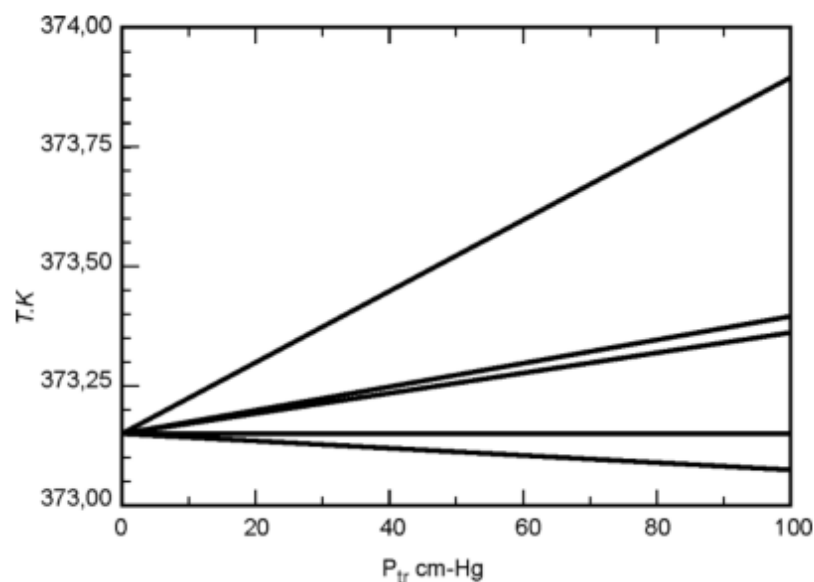
3. Melanjutkan pengurangan gas di bola kaca sehingga  $P_{TP}$  dan  $P_{NBP}$  memiliki nilai yang lebih kecil,  $P_{TP}$  memiliki hasil, katakan 40 kPa, 20 kPa dan seterusnya. Pada masing-masing hasil  $P_{TP}$  menghitung  $\theta$  yang sesuai ( $P_{NBP}$ ).
4. Menggambarkan  $\theta(P_{NBP})$  dengan  $P_{TP}$  dan memperkirakan kurva yang dihasilkan pada sumbu di mana  $P_{TP} = 0$ . Baca dari grafik,

$$\lim_{P_{TP} \rightarrow 0} \theta(P_{NBP})$$

Dalam Gambar 1.13, kita menggambarkan grafik kurva-kurva yang didapatkan dari sebuah prosedur seperti itu untuk termometer-termometer yang volumenya konstan dari beberapa gas yang berbeda-beda. Kurva-kurva ini memperlihatkan bahwa pembacaan-pembacaan temperatur dari sebuah termometer gas yang volumenya konstan bergantung pada gas yang digunakan pada nilai-nilai tekanan referensi biasa ( $P_{NBP}$ ). Akan tetapi, jika tekanan referensi dikurangi maka pembacaan-pembacaan temperatur dari termometer gas volume konstan yang menggunakan gas-gas yang berbeda akan mendekati nilai yang sama. Maka, nilai temperatur yang diekstrapolasi hanya bergantung pada sifat-sifat umum dari gas dan bukan pada macamnya gas tersebut. Karena itu maka kita mendefinisikan sebuah skala temperatur gas ideal dengan hubungan:

$$T = 273,16 \text{ K} \lim_{P_{TP} \rightarrow 0} \left( \frac{P}{P_{TP}} \right) \quad (V \text{ konstan}) \quad (1.13)$$

Walaupun skala temperatur gas ideal adalah berdiri sendiri dari sifat beberapa unsur gas, hal ini tetap bergantung pada sifat gas secara umum. Helium adalah gas yang paling banyak digunakan untuk tujuan termometrik dengan 2 alasan. Pada temperatur tinggi Helium tidak berdifusi melewati platinum, sebaliknya Hidrogen tidak demikian. Selanjutnya, helium menjadi cair saat temperatur rendah dibanding gas lainnya, dan oleh karena itu, termometer helium dapat digunakan untuk mengukur temperatur lebih rendah daripada termometer gas lainnya.



Gambar 1.13. Pembacaan dari sebuah termometer gas volume konstan untuk temperatur  $T$  dari uap yang mengembun sebagai fungsi  $P_{TP}$ , bila digunakan gas-gas yang berlainan. Helium memberikan temperatur  $T$  yang hampir sama pada semua tekanan sehingga sifatnya adalah paling mirip dengan sifat gas ideal di seluruh jangkauan nilai yang diperlihatkan.



