

Keseimbangan Termal dan Hukum ke Nol Termodinamika

Dwa Desa Warnana, S.Si.,M.Si



PENDAHULUAN

Termodinamika berasal dari kata Yunani yakni *thermos* = panas dan *dynamic* = perubahan sehingga dapat dikatakan sebagai cabang ilmu pengetahuan alam yang mempelajari perpindahan panas dan kerja dalam proses fisika maupun kimia. Dari pandangan kurikulum, termodinamika ini merupakan kelanjutan dari mata kuliah fisika dasar (khususnya tentang panas) dan dasar dari mata kuliah fisika statistik. Sehingga di dalam mempelajari ilmu termodinamika diharapkan Anda dapat memahami tentang konsep panas yang telah Anda pelajari sebelumnya.

Untuk menyegarkan kembali ingatan Anda tentang konsep panas, pada modul ini akan sedikit *mereview* tentang fenomena kalor/panas yang dimulai dengan sebuah pengkajian mengenai keseimbangan termal dan temperatur. Kita akan mencoba untuk membahas pengertian yang lebih mendalam mengenai fenomena ini dengan menjalin di skripsi mikroskopik dan mikroskopik – termodinamika dan mekanika statistik. Jalinan pandangan mikroskopik dan pandangan mikroskopik adalah merupakan ciri fisika pada jaman sekarang.

Modul ini dibagi dalam dua kegiatan belajar (KB), yaitu Kegiatan Belajar 1 dan Kegiatan Belajar 2, masing-masing mengenai Tinjauan makroskopik-mikroskopik dan sistem termodinamika serta keseimbangan termal dan hukum ke NOL termodinamika. Mengingat antara Kegiatan Belajar 1 dan Kegiatan Belajar 2 saling terkait erat maka pelajarilah dengan cermat agar dapat menyerap dan memahami dengan baik. Untuk meningkatkan pemahaman Anda dalam mempelajari modul ini, setiap kegiatan belajar akan diberikan beberapa contoh soal beserta penyelesaiannya, latihan beserta jawabannya, Rangkuman, Glosarium, serta tes Formatif yang jawabannya diberikan pada akhir modul.

Secara umum tujuan pembelajaran modul ini adalah Anda dapat menerapkan Kesetimbangan Termal dan Hukum Ke nol Termodinamika dalam persoalan Termodinamika.

Secara lebih khusus lagi tujuan pembelajaran modul ini adalah Anda dapat:

1. menjelaskan definisi termodinamika dan aplikasinya secara umum;
2. menjelaskan sistem fisika yang ditinjau secara makroskopik dan mikroskopik;
3. menerapkan hubungan antara besaran mikroskopik tekanan dan temperatur dengan besaran mikroskopik;
4. menjelaskan ruang lingkup dan sistem termodinamika;
5. menjelaskan kesetimbangan termal;
6. menerapkan konsep suhu dan hukum ke nol termodinamika;
7. menerapkan sifat termometris dalam skala suhu;
8. menerapkan hubungan antara termometer skala yang dinyatakan dalam Celcius, Fahrenheit, Reanmur, Kelvin dan Rankine.

Agar Anda dapat mempelajari modul ini dengan lancar ikutilah petunjuk singkat berikut ini.

1. Bacalah bagian pendahuluan dari modul ini dengan cermat dan ikutilah petunjuknya.
2. Bacalah dengan cepat bagian-bagian modul ini dan cobalah resapkan intisarinya.
3. Baca kembali bagian demi bagian dari modul ini dengan cermat dan cobalah buat rangkumannya dengan kata-kata sendiri. Bila ada kata-kata yang belum dipahami dengan baik carilah artinya dalam kamus atau tanyakan kepada teman atau tutor.
4. Diskusikan isi modul ini dengan teman-teman Anda agar tidak terjadi mis-konsepsi.

KEGIATAN BELAJAR 1

Tinjauan Makroskopik-Mikroskopik dan Sistem Termodinamika

A. DEFINISI DAN APLIKASI THERMODINAMIKA

Termodinamika adalah ilmu tentang energi, yang secara khusus membahas tentang hubungan antara energi panas dengan kerja. Seperti telah diketahui bahwa energi di dalam alam dapat terwujud dalam berbagai bentuk, selain energi panas dan kerja, yaitu energi kimia, energi listrik, energi nuklir, energi gelombang elektromagnet, energi akibat gaya magnet, dan lain-lain. Energi dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk lain, baik secara alami maupun hasil rekayasa teknologi. Selain itu energi di alam semesta bersifat kekal, tidak dapat dibangkitkan atau dihilangkan, yang terjadi adalah perubahan energi dari satu bentuk menjadi bentuk lain tanpa ada pengurangan atau penambahan. Prinsip ini disebut sebagai prinsip konservasi atau kekekalan energi. Prinsip termodinamika tersebut sebenarnya telah terjadi secara alami dalam kehidupan sehari-hari. Bumi setiap hari menerima energi gelombang elektromagnetik dari matahari, dan di bumi energi tersebut berubah menjadi energi panas, energi angin, gelombang laut, proses pertumbuhan berbagai tumbuh-tumbuhan dan banyak proses alam lainnya. Proses di dalam diri manusia juga merupakan proses konversi energi yang kompleks, dari input energi kimia dalam makanan menjadi energi gerak berupa segala kegiatan fisik manusia, dan energi yang sangat bernilai yaitu energi pikiran kita.

Dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi makaprinsip alamiah dalam berbagai proses termodinamika direkayasa menjadi berbagai bentuk mekanisme untuk membantu manusia dalam menjalankan kegiatannya. Mesin-mesin transportasi darat, laut, maupun udara merupakan contoh yang sangat kita kenal dari mesin konversi energi, yang merubah energi kimia dalam bahan bakar atau sumber energi lain menjadi energi mekanis dalam bentuk gerak atau perpindahan di atas permukaan bumi, bahkan sampai di luar angkasa. Pabrik-pabrik dapat memproduksi berbagai jenis barang, digerakkan oleh mesin pembangkit energi listrik yang menggunakan prinsip konversi energi panas dan kerja. Untuk kenyamanan

hidup, kita memanfaatkan mesin *air conditioning*, mesin pemanas, dan *refrigerators* yang menggunakan prinsip dasar termodinamika. Beberapa aplikasi dari termodinamika khususnya dalam rekayasa teknik disajikan dalam Tabel 1.1 berikut ini.

Tabel 1.1 beberapa aplikasi termodinamika

Cakupan dari Aplikasi termodinamika
Mesin automotif
Turbin
Pompa, Kompresor
Pembangkit tenaga nuklir, uap
Sistem pendorong pesawat terbang dan roket
Pemanas, ventilasi dan AC
Sistem pembakaran
Sistem energi alternatif:
Piranti termoelektrik dan termionic
Pembangkit tenaga sel surya
Sistem Geotermal
Pembangkit tenaga angin
Aplikasi Biomedis:
Sistem life-support
Organ buatan (artifisial)

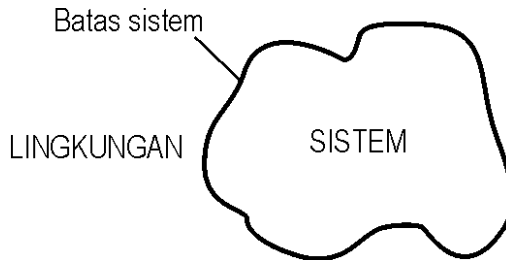
Aplikasi termodinamika yang begitu luas dimungkinkan karena perkembangan ilmu termodinamika sejak abad ke-17 yang dipelopori dengan penemuan mesin uap di Inggris, dan diikuti oleh para ilmuwan termodinamika seperti William Rankine, Rudolph Clausius, dan Lord Kelvin pada abad ke-19. Pengembangan ilmu termodinamika dimulai dengan pendekatan mikroskopik, yaitu sifat termodinamis didekati dari perilaku umum partikel-partikel zat yang menjadi media pembawa energi, yang disebut pendekatan termodinamika klasik. Pendekatan tentang sifat termodinamis suatu zat berdasarkan perilaku kumpulan partikel-partikel disebut pendekatan mikroskopis yang merupakan perkembangan ilmu termodinamika modern, atau disebut termodinamika statistik. Pendekatan

termodinamika statistik dimungkinkan karena perkembangan teknologi komputer, yang sangat membantu dalam menganalisis data dalam jumlah yang sangat besar.

B. TINJAUAN MAKROSKOPIK DAN MIKROSKOPIK

1. Tinjauan Makroskopik

Di dalam menganalisis situasi-situasi fisika, maka kita biasanya memusatkan perhatian kita pada suatu bagian materi yang kita pisahkan di dalam pikiran kita dari lingkungan luarnya. Kita menamakan bagian seperti itu adalah *sistem*. Segala sesuatu di luar sistem tersebut yang mempunyai pengaruh langsung kepada sifat sistem tersebut dinamakan *lingkungan*. Batas antara sistem dengan lingkungannya disebut *batas sistem (boundary)*, seperti terlihat pada Gambar 1.1. Dalam aplikasinya batas sistem merupakan bagian dari sistem maupun lingkungannya, dan dapat tetap atau dapat berubah posisi atau bergerak.



Gambar 1.1. Hubungan sistem, batas sistem dan lingkungan

Ketika suatu sistem telah dipilih, langkah selanjutnya adalah mendeskripsikan karakter atau sifat-sifat yang berhubungan dengan sistem atau interaksinya dengan lingkungan. Seperti yang telah disebutkan dalam perkembangan ilmu termodinamika di atas, secara umum ada dua tinjauan yang kita ambil yakni *tinjauan mikroskopik* dan *tinjauan makroskopik*. Tinjauan makroskopik meliputi variabel atau sifat dari suatu sistem yang didekati dengan ukuran manusia yang lebih besar sedangkan tinjauan mikroskopik meliputi sifat dari sistem yang didekati dengan ukuran molekul yang lebih kecil.

Jika kita ambil suatu sistem yang berisi sebuah silinder dalam mesin mobil. Analisa kimia akan menjelaskan tentang pencampuran hidrokarbon dengan udara sebelum dibakar, dan campuran setelah terjadi pembakaran yang menghasilkan produk hasil pembakaran yang memiliki ikatan kimia yang baru. Pernyataan dari segi kimiawi ini menjelaskan tentang massa dan komposisi dari sistem. Pada suatu saat sebuah sistem dapat dijelaskan lebih lanjut, misalkan aspek volume, di mana volume akan berubah-ubah sesuai dengan gerakan piston. Volume dari silinder dapat dengan mudah diukur dan dicatat dengan otomatis dalam laboratorium dengan cara memasang perangkat pada piston tersebut. Besaran lain yang sangat diperlukan dalam menjelaskan sistem ini adalah tekanan gas dalam silinder. Setelah terjadi pembakaran campuran (bahan bakar minyak dan udara), tekanan akan menjadi besar, sebaliknya setelah terjadi ledakan dalam ruang pembakaran tekanan akan menjadi kecil. Dalam laboratorium pengukur tekanan akan digunakan untuk mengukur dan mencatat perubahan tekanan selama mesin bekerja. Akhirnya, ada satu lagi besaran yang tak boleh diabaikan dalam menjelaskan mesin yang bekerja tersebut. Besaran tersebut adalah temperatur (suhu), sebagaimana kita lihat, besaran ini dapat kita ukur sebagaimana besaran massa, volume dan tekanan.

Kita telah dapat menjelaskan sistem dalam silinder dalam mesin kendaraan, dengan besaran masa, komposisi, volume, tekanan dan suhu. Besaran tersebut merujuk pada sesuatu dengan skala yang besar atau kumpulan sifat, dari suatu sistem yang memberikan penjelasan secara mikroskopik, sehingga bisa juga disebut kuantitas mikroskopik. Untuk sistem lain selain gas seperti tegangan tali, bahan dielektrik, batang paramagnetik dan besaran yang berbeda haruslah disesuaikan untuk dapat memberikan penjelasan mikroskopik dari sistem tersebut; akan tetapi kuantitas mikroskopik secara umum memiliki sifat sebagai berikut.

1. Tidak mengandung asumsi khusus menyangkut struktur materi, medan, atau radiasi.
2. Mendeskripsikan sistem secara sederhana (memerlukan sedikit karakter dalam memberikan penjelasan).
3. Bersifat sangat mendasar, dapat dirasakan oleh indera.
4. Bersifat umum dan dapat diukur secara langsung.

Singkatnya, penjelasan secara mikroskopik dari suatu sistem mengandung beberapa sifat umum yang dapat diukur yang dimiliki oleh sistem tersebut. Termodinamika merupakan salah satu cabang dari ilmu alam yang sesuai dengan sifat mikroskopik atau karakteristik alam, termasuk kuantitas mikroskopik dari temperatur untuk setiap sistem. Adanya temperatur dalam termodinamika membedakan ilmu ini dengan cabang ilmu yang lain seperti, optik geometri, mekanika listrik dan magnet.

Contoh

Pada saat Anda menjatuhkan bola dari ketinggian tertentu, maka bola bergerak jatuh bebas ke tanah. Bagaimana anda menggambarkan hubungan sistem dan lingkungannya pada kasus bola jatuh bebas ini?

Penyelesaian:

Pada kasus bola jatuh bebas, maka bola dapat merupakan sistemnya dan lingkungannya dapat berupa udara dan bumi. Di dalam jatuh bebas kita dapat mencoba menentukan bagaimana udara dan bumi mempengaruhi gerakan bola tersebut.

2. Tinjauan Mikroskopik

Tinjauan mikroskopik merupakan hasil dari kemajuan yang pesat dalam pengetahuan mengenai molekul, atom dan inti selama kurun waktu satu abad ini. Dengan tinjauan ini suatu sistem dianggap terdiri dari jumlah yang amat besar (N) partikel, di mana setiap partikel memiliki energi E_1, E_2, \dots, E_N . Suatu partikel diasumsikan dapat berinteraksi antara satu dengan yang lainnya yang berarti terjadi tumbukan, atau ada gaya interaksi yang menyebabkan medan. Sistem partikel dapat dibayangkan terisolasi, atau dalam beberapa kasus dianggap sebagai sekelompok sistem yang sama yang terikat, atau disebut *sistem assembly*. Sehingga probabilitas matematik diterapkan, dan tingkat/derajat persamaan dari sistem tersebut diasumsikan sebagai tingkat/derajat dengan probabilitas yang terbesar. Masalah mendasar adalah menemukan jumlah partikel dalam setiap tingkat energi (tingkat populasi) jika suatu persamaan mampu menjangkau. Mekanika statistik, merupakan salah satu cabang ilmu alam yang sesuai dengan karakter mikroskopik dari alam.

Perlu diketahui bahwa mekanika statistik akan dibicarakan dalam buku ajar lainnya sehingga tidak perlu membahas materi lebih lanjut berdasarkan

tinjauan mikroskopik. Sehingga jelas dari uraian di atas, bahwa penjelasan mikroskopik dari suatu sistem memiliki sifat sebagai berikut.

1. Memiliki asumsi menyangkut struktur materi, medan dan radiasi.
2. Menetapkan beberapa besaran untuk menjelaskan sistem.
3. Besaran yang ditetapkan tak perlu dapat dirasakan oleh indera, akan tetapi cukup dengan model matematis.
4. Tidak dapat diukur secara langsung, akan tetapi haruslah dihitung.

Contoh

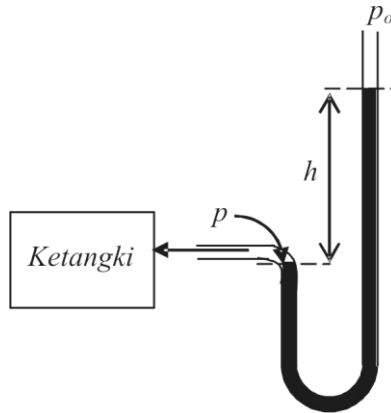
Contoh-contoh aplikasi dari termodinamika yang memerlukan kajian mikroskopis untuk menjelaskan gejala fisiknya antara lain adalah laser, plasma (lapisan tipis), aliran gas kecepatan sangat tinggi, kinetika kimia, temperatur sangat rendah (*crogenics*), dan sebagainya.

3. Hubungan Tinjauan Makroskopik dan Tinjauan Mikroskopik

Walaupun kelihatannya kedua tinjauan tersebut sangatlah berbeda dan tidak cocok, akan tetapi kedua tinjauan tersebut diterapkan dalam sistem yang sama sehingga harus menghasilkan kesimpulan yang sama pula. Kedua tinjauan tersebut dapat disatukan karena beberapa sifat yang dapat diukur secara langsung yang memberikan penjelasan secara makroskopik sebenarnya merupakan harga rata-rata dari sejumlah besar sifat-sifat mikroskopik sistem dalam jangka waktu tertentu. Sebagai contoh, tekanan sebuah gas, yang dipandang secara makroskopik, diukur secara operasional dengan menggunakan sebuah *manometer*. Gambar 1.2 merupakan salah satu contoh alat manometer terbuka yang mengukur tekanan tolak. Manometer tersebut terdiri dari sebuah tabung yang berbentuk U yang bersisi cairan, sebuah ujung tabung adalah terbuka ke atmosfer dan ujung lainnya dihubungkan kepada sebuah sistem (misalkan tangki) yang tekanannya p akan kita ukur. Persamaan yang digunakan adalah:

$$p - p_o = \rho gh \quad (1.1)$$

Jadi, tekanan tolak, $p - p_o$ adalah sebanding dengan perbedaan tinggi dari kolom-kolom cairan di dalam tabung U. Jika tabung tersebut berisi gas di bawah tekanan tinggi maka suatu cairan yang rapat seperti air raksa dapat digunakan di dalam tabung tersebut dan air dapat digunakan bila yang terlibat adalah tekanan gas rendah.



Gambar 1.2. Manometer tabung terbuka

Dipandang secara mikroskopik, maka tekanan tersebut dihubungkan kepada kecepatan rata-rata per satuan luas pada kecepatan di mana molekul-molekul gas mengantarkan momentum kepada fluida manometer sewaktu molekul-molekul menumbuk permukaan manometer.

Tekanan, bagaimanapun juga, merupakan sifat yang dapat kita rasakan, dan kita dapat merasakan efek dari tekanan tersebut. Tekanan sendiri telah muncul, dapat diukur dan digunakan dalam jangka waktu lama sebelum diketahui alasan bahwa tekanan merupakan hasil dari adanya interaksi molekul. Jika teori tentang molekul berubah, contohnya dengan tidak menggunakan hasil *chaos*, konsep tekanan akan tetap dimengerti oleh semua orang. Beberapa pengukuran sifat makroskopik juga sama seperti yang kita rasakan. Sifat tersebut tidak akan berubah selama indera kita merasakan hal yang sama dan tidak salah. Perbedaan penting antara tinjauan makroskopik dan mikroskopik adalah tinjauan mikroskopik diluar jangkauan indera kita dan pengukuran langsung menyangkut struktur mikroskopik partikel, gerakan, tingkat energi dan interaksinya kemudian menghitung besaran yang terukur. Tinjauan mikroskopik mengalami perubahan beberapa kali, dan kita tak pernah yakin bahwa asumsi tersebut dibenarkan sampai kita membandingkan beberapa kesimpulan berdasarkan asumsi tersebut dengan kesimpulan yang sama dengan hasil percobaan bukti tinjauan makroskopik. Dengan kata lain, ketika kita mencoba untuk mengerti kenyataan fisis dari

hasil perhitungan mikroskopik, maka kita harus melihat tinjauan makroskopik sebagai pedoman.

Lewat sejarahnya, penyelidikan mengenai termodinamika selalu dicari dari hukum umum, hubungan, dan prosedur untuk memahami fenomena makroskopik ketergantungan suhu. Karena tidak ada asumsi mengenai struktur mikroskopik dari materi makatermodinamika tidak disanggah sebagaimana tetapan mikroskopik model klasik dan kuantum yang dimasukkan dalam mekanika statistik.

Contoh

Bagaimana cara memandang hubungan makroskopis dan mikroskopis dari temperatur sebuah gas?

Penyelesaian:

Seperti halnya kita memandang tekanan dalam gas pada contoh di atas, maka 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.

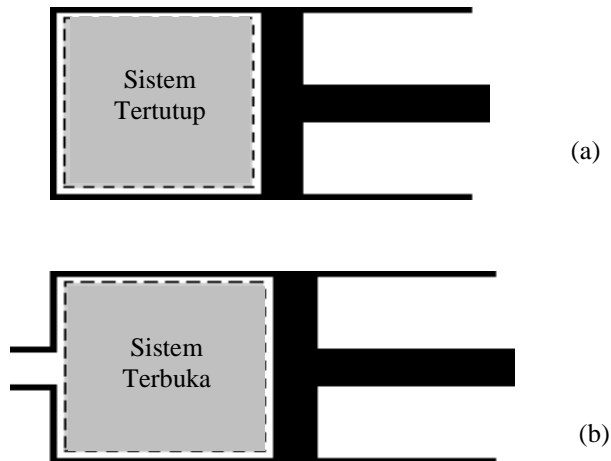
C. RUANG LINGKUP DAN SISTEM TERMODINAMIKA

Telah ditegaskan bahwa penjelasan umum dari sifat suatu sistem, yang berarti beberapa sifat yang terukur, dapat dirasakan oleh indera kita, merupakan penjelasan secara makroskopik. Penjelasan tersebut merupakan titik awal penyelidikan dalam semua cabang ilmu alam. Sebagai contoh, sesuai mekanika benda tegar, kita mengambil tinjauan makroskopik yang hanya mempertimbangkan aspek eksternal dari benda tegar. Letak pusat, dari benda tegar ditetapkan dengan teliti pada sumbu koordinat. Posisi dan waktu dan kombinasi keduanya seperti kecepatan merupakan beberapa besaran makroskopik yang digunakan dalam mekanika klasik atau disebut kuantitas mekanik. Kuantitas mekanik digunakan untuk menentukan energi potensial dan kinetik berdasarkan sumbu kuantitas, satuan, energi potensial dan kinetik benda secara menyeluruh. Tujuan dari mekanika adalah untuk mencari hubungan antara posisi dan waktu sebagaimana hukum Newton tentang gerak. Bagaimanapun juga, dalam termodinamika perhatian tertuju langsung pada isi dari sistem. Sehingga kita gunakan tinjauan makroskopik, dan

ditekankan pada besaran makroskopik yang ada pada sistem. Hal ini merupakan fungsi dari percobaan yaitu untuk menentukan besaran yang tepat sebagai penjelasan seperti energi dalam. Besaran makroskopik termasuk suhu, melahirkan keadaan internal dari sistem yang disebut *kuantitas termodinamika*. Kuantitas tersebut digunakan untuk menentukan energi dalam dari sebuah sistem. Hal tersebut merupakan tujuan termodinamika, dengan kuantitas termodinamika terdapat hubungan umum yang sesuai dengan hukum dasar termodinamika.

Sistem yang digambarkan dalam bentuk kuantitas termodinamika dinamakan *sistem termodinamika*. Dalam bidang teknik, sistem termodinamika yang sangat penting adalah gas, seperti udara, uap; campuran, seperti uap minyak dan udara; dan uap yang berhubungan dengan cairan, seperti cairan dan uap freon. Termodinamika kimia sesuai dengan sistem ini berkaitan dengan transfer energi dalam reaksi kimia seperti permukaan lapisan tipis, sel listrik. Termodinamika fisika termasuk di dalamnya seperti sistem dalam kawat resistor, kapasitor, dan bahan paramagnetik.

Secara umum dalam termodinamika ada dua jenis sistem, yaitu sistem tertutup dan sistem terbuka (lihat Gambar 1.3). Dalam sistem tertutup massa dari sistem yang dianalisis tetap dan tidak ada massa keluar dari sistem atau masuk ke dalam sistem, tetapi volumenya bisa berubah. Jadi, yang dapat keluar masuk sistem tertutup adalah energi dalam bentuk panas atau kerja.



Gambar 1.3. Jenis sistem dalam termodinamika. (a) sistem tertutup, (b) sistem terbuka

Sistem tertutup dikatakan *terisolasi* jika tidak ada energi dalam bentuk apapun yang melintasi batasnya. Contoh sistem tertutup adalah suatu balon udara yang dipanaskan, di mana massa udara di dalam balon tetap, tetapi volumenya berubah, dan energi panas masuk ke dalam massa udara di dalam balon. Dalam sistem terbuka, energi dan massa dapat keluar sistem atau masuk ke dalam sistem melewati batas sistem. Sebagian besar mesin-mesin konversi energi adalah sistem terbuka. Sistem mesin motor bakar adalah ruang di dalam silinder mesin, di mana campuran bahan bakar dan udara masuk ke dalam silinder, dan gas buang keluar sistem melalui knalpot. Turbin gas, turbin uap, pesawat jet dan lain-lain adalah merupakan sistem termodinamika terbuka, karena secara simultan ada energi dan massa keluar-masuk sistem tersebut. Karakteristik yang menentukan sifat dari sistem disebut *variabel keadaan/sifat* sistem, seperti tekanan (P), temperatur (T), volume (V), massa (m), viskositas, konduksi panas, dan lain-lain. Selain itu ada juga *sifat* yang didefinisikan dari *sifat* yang lainnya seperti, berat jenis, volume spesifik, panas jenis, dan lain-lain.

Dari penjelasan di atas, secara umum variabel keadaan dari sistem termodinamika dapat digolongkan menjadi 2 (dua) besaran, yakni:

1. besaran *ekstensif*, yakni variabel keadaan yang berbanding lurus dengan massa atau volume (ukuran) dari sistem. Perbandingan antara besaran ekstensif dengan massa disebut besaran *spesifik* (biasanya disimbolkan dengan huruf kecil).
2. besaran *intensif*, yakni variabel keadaan yang tidak bergantung pada massa atau volume dari sistem.

Sebagai contoh; misalkan volume sebuah sistem adalah V , dan volume spesifik dinyatakan oleh $\nu = V/m$. Jelas bahwa volume spesifik berbanding terbalik dengan kerapatan massa, ρ , yakni massa persatuan volume:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{\nu} \quad (1.2)$$

Dari persamaan di atas, terlihat bahwa ν tidak bergantung pada volume atau massa, dengan kata lain ν merupakan besaran intensif. Pada banyak kasus termodinamika, lebih menguntungkan merumuskan dalam besaran spesifik (intensif) karena persamaan menjadi tidak bergantung pada massa atau volume.

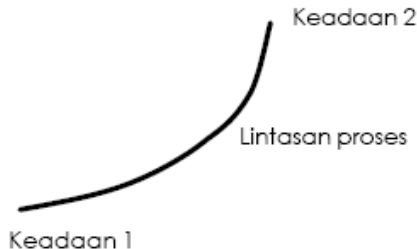
Pada Tabel 1.2 ini akan disajikan juga contoh besaran intensif dan besaran ekstensif pada beberapa sistem termodinamika.

Tabel 2.1. Pemakaian besaran intensif dan besaran ekstensif

Sistem	Besaran intensif	Besaran ekstensif
Hidrostatik	Tekanan (P)	Volume (V)
Tegangan tali	Tegangan (τ)	Panjang (L)
Film Tipis	Tegangan permukaan (γ)	Luasan (A)
Sel elektrokimia	Emf (ϵ)	Muatan (Z)
Papan dielektrik	Medan listrik (E)	Polarisasi
Batang paramagnetik	Medan listrik (H)	Magnetisasi (M)
Sistem lainnya	Temperatur (T)	Entropi (S)
Sistem umum	Gaya umum	pergeseran

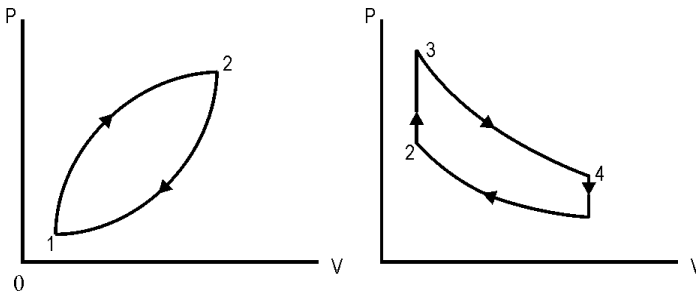
Suatu sistem dapat berada pada suatu kondisi yang tidak berubah, apabila masing-masing jenis sifat sistem tersebut dapat diukur pada semua bagiannya dan tidak berbeda nilainya. Kondisi tersebut disebut sebagai keadaan (*state*) tertentu dari sistem, di mana sistem mempunyai nilai sifat yang tetap. Apabila sifatnya berubah maka keadaan sistem tersebut disebut mengalami perubahan keadaan. Suatu sistem yang tidak mengalami perubahan keadaan disebut sistem dalam keadaan seimbang (*equilibrium*).

Perubahan sistem termodinamika dari keadaan seimbang satu menjadi keadaan seimbang lain disebut proses, dan rangkaian keadaan di antara keadaan awal dan akhir disebut lintasan proses seperti terlihat pada Gambar 1.4 di bawah ini:



Gambar 1.4. Proses dari keadaan 1 ke keadaan 2

Tergantung dari jenis prosesnya, maka keadaan 2 dapat dicapai dari keadaan 1 melalui berbagai lintasan yang berbeda. Proses termodinamika biasanya digambarkan dalam sistem koordinat dua *sifat*, yaitu P-V diagram, P-v diagram, atau T-S diagram. Proses yang berjalan pada satu jenis *sifat* tetap, disebut proses iso – diikuti nama *sifat* nya, misalnya proses isobaris (tekanan konstan), proses isochoris (volume konstan), proses isothermis (temperatur konstan) dan lain-lain. Suatu sistem disebut menjalani suatu siklus, apabila sistem tersebut menjalani rangkaian beberapa proses, dengan keadaan akhir sistem kembali ke keadaan awalnya. Pada Gambar 1.5 (a) terlihat suatu siklus terdiri dari 2 jenis proses, dan Gambar 1.5 (b) siklus lain dengan 4 jenis proses.



Gambar 1.5.

Diagram siklus termodinamika. (a) siklus dengan 2 proses, (b) siklus dengan 4 proses

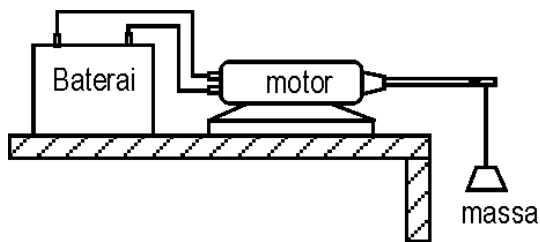


LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Tulislah pengertian istilah berikut ini: sistem, sistem terbuka, keadaan, besaran intensif, dan kesetimbangan!
- 2) Tulislah pengertian berikut ini: sistem tertutup, sistem terisolasi, pandangan mikroskopik, dan siklus!

- 3) Jelaskan satuan dalam SI beserta simbolnya dari besaran berikut ini: massa, panjang, waktu, gaya, densitas, spesifik volume, tekanan, dan temperatur!
- 4) Jelaskan apakah selain besaran Tekanan dan Temperatur setiap sistem yang ditinjau secara makroskopis dan mikroskopis akan menghasilkan besaran kuantitas yang berbeda?
- 5) Pada gambar di bawah ini, arus listrik dari baterai menggerakkan motor listrik. Batang motor dihubungkan dengan katrol massa sehingga menaikkan sebuah beban. Jika dimisalkan motor sebagai sebuah sistem, identifikasikan lokasi dari batas sistem, lingkungan dan jelaskan perubahan yang terjadi pada sistem setiap waktu!



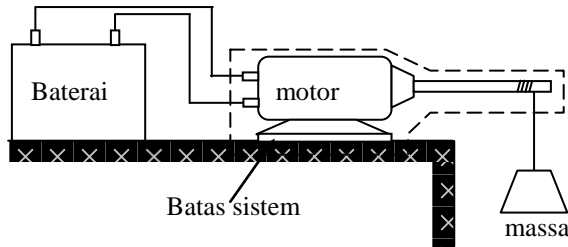
Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) a. *Sistem* adalah benda/sekumpulan benda atau daerah yang dipilih untuk dijadikan obyek analisis.
 - b. *Sistem terbuka* adalah merupakan sistem di mana energi dan massa dapat ke luar sistem atau masuk ke dalam sistem melewati batas sistem.
 - c. *Keadaan* adalah suatu kondisi tertentu dari sistem termodinamika.
 - d. *Besaran intensif* adalah sebuah variabel keadaan yang tidak bergantung pada massa atau volume dari sistem.
 - e. *Keseimbangan* adalah merupakan suatu sistem yang tidak mengalami perubahan keadaan.
- 2) a. *Sistem tertutup* adalah suatu sistem di mana massa dari sistem yang dianalisis tetap dan tidak ada massa keluar dari sistem atau masuk ke dalam sistem, tetapi volumenya bisa berubah.

- b. *Sistem terisolasi* adalah suatu sistem tertutup di mana tidak ada energi dalam bentuk apapun yang melintasi batasnya.
 - c. *Pandangan makroskopis* adalah merupakan sifat termodinamis yang dapat didekati dari perilaku umum partikel-partikel zat yang menjadi media pembawa energi.
 - d. *Siklus* adalah suatu sistem yang menjalani rangkaian beberapa proses, dengan keadaan akhir sistem kembali ke keadaan awalnya.
- 3) Berikut adalah merupakan satuan dalam SI beserta simbolnya dari besaran berikut ini.

Besaran	satuan	simbol
massa	Kilogram	Kg
panjang	Meter	M
waktu	Detik	S
gaya	Newton (= 1 kg.m/s ²)	N
densitas	Kilogram per meter kubik	Kg/m ³
Spesifik volume	Meter kubik per kilogram	m ³ /kg
tekanan	Pascal (1 pascal = 1 N/m ²)	Pa
temperatur	Kelvin	K

- 4) Seperti yang telah dijelaskan di atas bahwa untuk setiap sistem, maka kuantitas makroskopis (termasuk di dalamnya tekanan dan temperatur) dan kuantitas mikroskopis haruslah saling berhubungan karena kuantitas-kuantitas tersebut sekedar merupakan cara-cara yang berbeda untuk menjelaskan sistem yang sama. Karenanya kuantitas selain temperatur dan tekanan juga akan menghasilkan besaran kuantitas yang sama.
- 6) Seperti pada gambar di bawah bahwa batas sistem dapat ditunjukkan sebagai permukaan dari motor. Baterai, massa beserta udara di sekitar motor merupakan lingkungannya. Perubahan yang terjadi pada sistem motor ini terhadap waktu adalah sistem akan semakin panas dikarenakan gerak mekaniknya menyebabkan adanya gesekan dengan udara di batas dan lingkungan sekitarnya.



RANGKUMAN

Termodinamika adalah ilmu tentang energi, yang secara khusus membahas tentang hubungan antara energi panas dengan kerja. Perkembangan ilmu termodinamika dimulai sejak abad 17 dan konsep-konsep termodinamika ditemukan pada akhir abad ke 19. Pengembangan ilmu termodinamika dimulai dengan *tinjauan makroskopik*, yaitu sifat termodinamis didekati dari perilaku umum partikel-partikel zat yang menjadi media pembawa energi, yang disebut pendekatan termodinamika klasik. Pendekatan tentang sifat termodinamis suatu zat berdasarkan perilaku kumpulan partikel-partikel disebut *tinjauan mikroskopis* yang merupakan perkembangan ilmu termodinamika modern, atau disebut termodinamika statistik.

Ruang lingkup dari termodinamika adalah isi dari sebuah sistem. Suatu *sistem* termodinamika adalah suatu massa atau daerah yang dipilih, untuk dijadikan obyek analisis. Daerah sekitar sistem tersebut dinamakan sebagai *lingkungan*. Batas antara sistem dengan lingkungannya disebut *batas sistem*. Dalam termodinamika ada dua jenis sistem, yaitu *sistem tertutup* dan *sistem terbuka*. Karakteristik yang menentukan sifat dari sistem disebut *variabel keadaan/sifat* sistem, yang digolongkan menjadi dua yakni *besaran instensif* dan *besaran ekstensif*.



TES FORMATIF 1

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Daerah antara sistem dengan lingkungannya disebut
 - A. sistem
 - B. lingkungan
 - C. batas sistem
 - D. sifat sistem

- 2) Pendekatan makroskopis disebut juga sebagai pendekatan termodinamika
- A. klasik
 - B. modern
 - C. teknik
 - D. statistik
- 3) Berikut ini yang bukan merupakan sifat-sifat makroskopis, yaitu
- A. tidak mengandung asumsi khusus
 - B. menetapkan beberapa besaran untuk menjelaskan sistem
 - C. dapat dirasakan oleh indera
 - D. dapat diukur langsung
- 4) Salah satu contoh kuantitas mikroskopis adalah
- A. temperatur
 - B. tekanan
 - C. panjang
 - D. jumlah partikel dalam setiap tingkat energi
- 5) Berikut ini yang bukan merupakan sifat-sifat mikroskopis, yaitu
- A. tidak mengandung asumsi khusus
 - B. menetapkan beberapa besaran untuk menjelaskan sistem
 - C. menggunakan model matematis
 - D. melakukan perhitungan matematika
- 6) Karakteristik yang menentukan sifat dari sistem disebut
- A. lingkungan
 - B. variabel
 - C. proses
 - D. siklus
- 7) Yang bukan termasuk contoh dari sistem terbuka adalah
- A. Air conditioning
 - B. Mesin pemanas
 - C. Sistem Geotermal
 - D. Balon udara
- 8) Sistem termodinamika di mana tidak ada energi dalam bentuk apapun yang melintasi batasnya disebut sistem
- A. terbuka
 - B. tertutup

- C. terisolasi
D. makrokopis
- 9) Yang termasuk besaran intensif berikut ini adalah
A. medan magnet
B. entropi
C. polarisasi
D. volume
- 10) Proses termodinamika yang tekanannya dibuat tetap/konstan disebut
A. Isotermik
B. isobarik
C. isokhorik
D. adiabatik

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 1 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 1.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali
80 - 89% = baik
70 - 79% = cukup
< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan Kegiatan Belajar 2. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 1, terutama bagian yang belum dikuasai.

KEGIATAN BELAJAR 2

Kesetimbangan Termal dan Hukum ke Nol Termodinamika

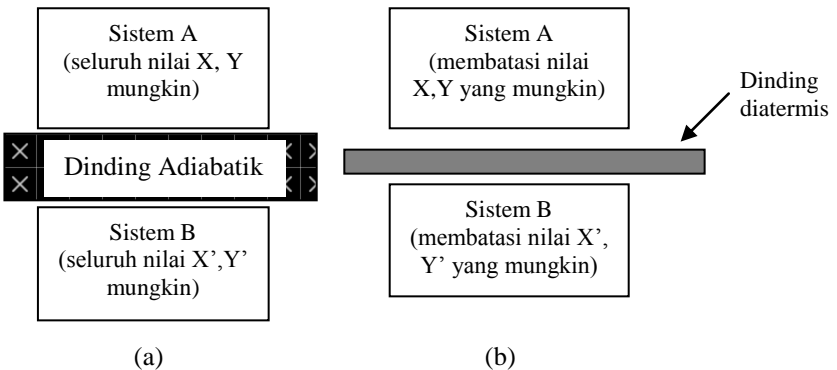
A. KESETIMBANGAN TERMAL

Dalam Kegiatan Belajar 1, kita telah melihat penjelasan secara makroskopik dari gas di mana telah diberikan besaran-besarnya seperti massa, tekanan, dan volume. Juga telah dicontohkan kuantitas makroskopis lainnya dari gas yakni temperatur. Pada Kegiatan Belajar 2 ini, akan dimulai dengan perkembangan tentang analisa kuantitas temperatur. 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. Dilain 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 sintesis 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.

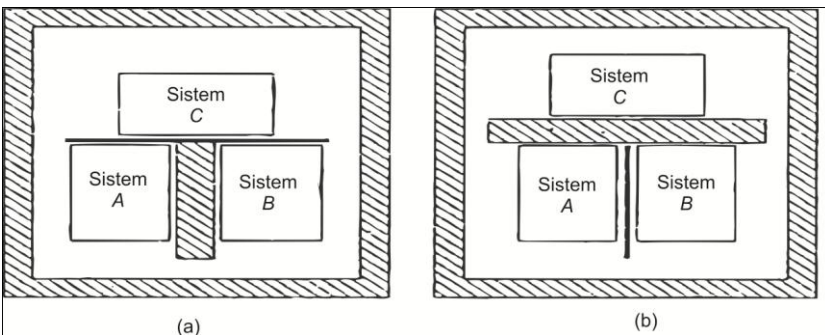


Gambar 1.6. Sifat dinding dari (a) adiabatik, (b) diatermis

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. Sedangkan 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

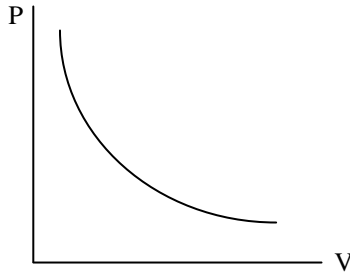
Dapatkah Anda jelaskan tentang hukum Boyle?

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

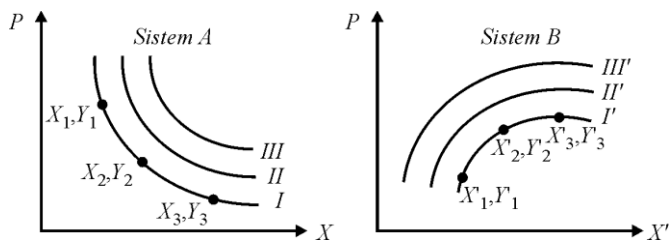
Dalam kesetimbangan termodinamika, selain kesetimbangan termal (temperatur) juga harus memenuhi kesetimbangan mekanik dan kesetimbangan kimia. Artinya kuantitas dalam mekanik maupun kimia juga harus setimbang, contohnya tekanan, gaya, tegangan, konsentrasi dan lain-lain.

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.

Dalam Kegiatan Belajar 1 juga telah dijelaskan tinjauan makroskopis dan mikroskopis dari temperatur. 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* maka temperatur 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.

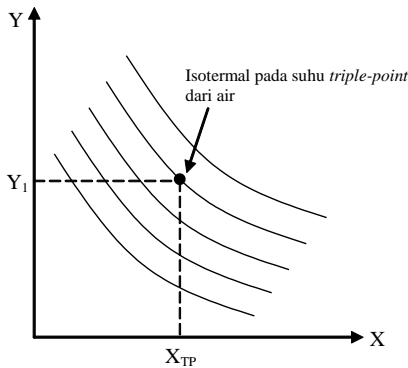
C. PENENTUAN KUANTITATIF SKALA TEMPERATUR

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 gampangannya 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 isothermal pada tiap titik yang memiliki koordinat yang sama tetapi koordinat X-nya berbeda. Kumpulan temperatur dengan masing-masing isothermal 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 θ 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:

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

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 isothermal 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	ϵ
Helium cair	Tekanan	P
Garam paramagnetik	Susepibilitas magnetik	χ
Radiasi benda hitam	Eksitasi 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 makatemperatur 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:

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

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 θ . 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:

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

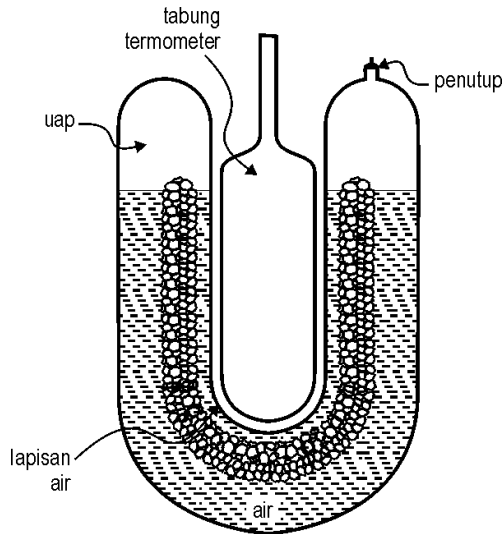
di mana untuk semua termometer,

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

sehingga;

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

Bila sifat termometrik mempunyai nilai X maka temperatur θ , 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 triple, 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 $133,32 \text{ kPa}$ ketika ditempatkan di dalam sebuah sel titik triple. Berapakah temperatur jika ujung tersebut ditempatkan di dalam sebuah lingkungan sehingga tekanannya menjadi $204,69 \text{ kPa}$?

Penyelesaian:

Dari persamaan (1.10) diperoleh,

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

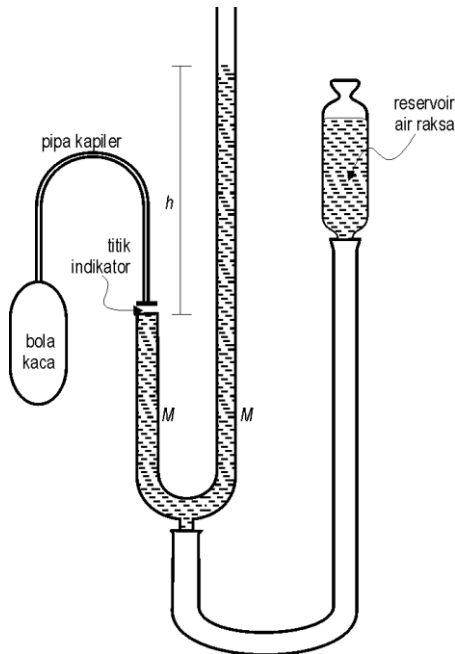
Jadi, temperatur sel titik triple yang ujungnya ditempatkan dalam sebuah lingkungan yang tekanannya berubah dari $133,320 \text{ kPa}$ menjadi $204,69 \text{ kPa}$ adalah sebesar $419,39 \text{ K}$.

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 θ yang akurat. Huruf Yunani theta (θ) 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 θ 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.

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

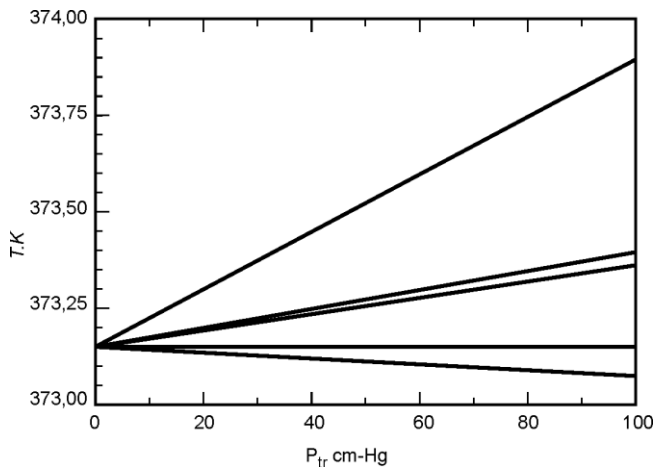
3. Melanjutkan pengurangan gas di bola kaca sehingga P_{TP} dan P_{NBP} memiliki nilai yang lebih kecil, P_{TP} memiliki hasil, katakan 40 kPa, 20 kPa dan seterusnya. Pada masing-masing hasil P_{TP} menghitung θ yang sesuai (P_{NBP}).
4. Menggambar $\theta(P_{NBP})$ dengan P_{TP} dan memperkirakan kurva 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.

Temperatur gas ideal terendah yang dapat diukur dengan termometer gas volume konstan adalah kira-kira 2,6 K. Untuk mendapatkan temperatur ini, maka kita harus menggunakan ^3He bertekanan rendah, karena helium akan menjadi sebuah cairan pada suatu temperatur yang lebih rendah dari pada temperatur dari setiap gas lainnya. Temperatur $T = 0$ tetap masih tidak dapat diterangkan artinya dengan termometri.

Kita ingin mendefinisikan sebuah skala temperatur dengan cara yang *tak bergantung dari sifat-sifat sesuatu zat*. Kita akan memperlihatkan di dalam

bagian modul tentang ‘Hukum ke-2 termodinamika bahwa *skala temperatur termodinamika absolut*, yang dinamakan skala Kelvin adalah sebuah skala seperti itu. Kita akan memperlihatkan juga bahwa *skala gas ideal dan skala Kelvin adalah identik di dalam jangkauan nilai temperatur di mana sebuah termometer gas dapat digunakan*. Karena alasan ini, maka kita dapat menuliskan “K” untuk memberi nama kepada sebuah temperatur gas ideal, seperti yang telah kita lakukan.

Kita akan memperlihatkan pula bahwa skal Kelvin mempunyai sebuah *nol absolut* sebesar 0 K dan bahwa temperatur-temperatur di bawah nol absolut tidak ada. Nol absolut dari temperatur telah menentang semua usaha untuk mencapainya secara eksperimental, walaupun mungkin untuk mendekati dengan sedekat mungkin. Adanya nol absolut disimpulkan dengan ekstrapolasi. Anda jangan memikirkan nol absolut sebagai sebuah keadaan yang tenaganya nol dan tidak ada gerakan. Konsepsi bahwa semua aksi molekul akan berhenti pada nol absolut tidaklah benar. Pengertian ini menganggap bahwa konsep makroskopik murni mengenai temperatur adalah seluruhnya dihubungkan dengan konsep mikroskopik mengenai gerakan molekul. Bila kita mencoba membuat sebuah hubungan seperti itu, maka ternyata kita mendapatkan bahwa sewaktu kita mendekati nol absolut, maka tenaga kinetik molekul-molekul akan mendekati suatu nilai yang terbatas, yang dinamakan *tenaga titik nol*. Tenaga molekul adalah suatu minimum, tetapi tidak sama dengan nol, pada nol absolut.

Contoh

Jika nilai limit dari rasio tekanan gas pada titik uap dan titik *tripel* dari air ketika volume gas dijaga konstan adalah 1,22. Tentukanlah temperatur gas ideal pada titik uap tersebut!

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} \text{Dari persamaan (1.13) diperoleh, } T &= 273,16 \text{ K } \lim_{P_{TP} \rightarrow 0} \left(\frac{P}{P_{TP}} \right) = \\ (273,16) \times (1,22) & \\ &= 333,255 \text{ K} \end{aligned}$$

F. SKALA TEMPERATUR CELSIUS, FAHRENHEIT DAN RANKINE

Skala temperatur Celsius, yang diciptakan oleh astronom Swedia Anders Celsius pada tahun 1742, dinamakan juga skala *Centrigade* (bagian perseratus), menjadi skala temperatur internasional sebelum memperkenalkan skala Kelvin di tahun 1954. Skala ini didefinisikan dengan menggunakan Skala Kelvin, yang merupakan skala temperatur fundamental di dalam ilmu pengetahuan.

Skala temperatur Celcius menggunakan satuan “Derajat Celcius” (Simbol °C) yang sama dengan satuan “Kelvin”. Jika T_c kita misalkan menyatakan temperatur Celcius, maka:

$$T_c = T - 273,15^\circ \quad (1.14)$$

Menghubungkan temperatur Celcius T_c (°C) dan temperatur Kelvin T (K). Kita melihat bahwa titik tripel air (=273,16 K) bersesuaian dengan 0,01°C. Dengan eksperimen, maka temperatur di mana es dan air jenuh udara berada di dalam kesetimbangan pada tekanan atmosfer yang dinamakan titik es adalah sebesar 0.00°C dan temperatur di mana uap dan air cair berada dalam kesetimbangan pada tekanan satu atmosfer yang dinamakan titik uap sebesar 100,00°C.

Skala Fahrenheit, yang masih digunakan di beberapa negara yang berbahasa Inggris tidaklah digunakan di dalam bidang pekerjaan ilmiah. Hubungan di antara skala Fahrenheit dan skala Celcius didefinisikan sebagai:

$$T_F = 32 + 9/5 T_C \quad (1.15)$$

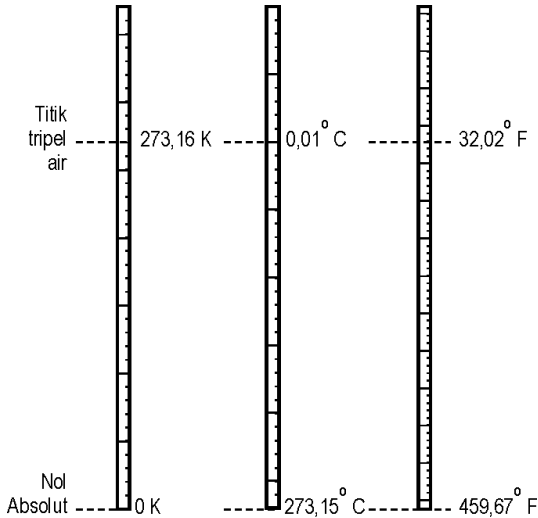
Dari hubungan ini kita dapat menyimpulkan bahwa titik es (0,00°C) sama dengan 32,0°F dan bahwa titik uap (100.00 °C) sama dengan 212.0 °F, serta satu derajat Fahrenheit adalah sama dengan 5/9 kali satu derajat Celcius. Di dalam gambar 1.14 kita membandingkan skala-skala Kelvin, Celcius dan Fahrenheit.

Dengan definisi pula, skala Rankine, yang diciptakan oleh insinyur Inggris, adalah sebuah skala absolut dan ini didasarkan semata-mata pada temperatur titik tripel air. Skala Rankine, yang tidak menggunakan kata ‘derajat’, dihubungkan dengan skala temperatur Kelvin dengan persamaan:

$$T_R = 9/5 T_K \quad (1.16)$$

Skala Fahrenheit, jika dihubungkan dengan skala Rankine memenuhi persamaan:

$$T_F = T_R - 459.67 \quad (1.17)$$



Gambar 1.14. skala-skala temperatur Kelvin, Celcius dan Fahrenheit

Contoh

Nyatakan 20 °C dan -5 °C dalam skala Kelvin!

Penyelesaian

Dari persamaan (1.14), $T_c = T - 273,15^\circ$ atau $T(K) = 273,15 + T_c$

Jika $T_c = 20^\circ\text{C}$, maka $T(K) = 273,15 + 20 = 293,15\text{ K}$

Jika $T_c = -5^\circ\text{C}$, maka $T(K) = 273,15 - 5 = 268,15\text{ K}$

Contoh

Tentukan temperatur dalam Celcius jika temperatur ruangan menunjukkan 77°F!

Penyelesaian:

Dengan menggunakan persamaan (1.15), maka kita dapat menentukan temperatur ruangan dalam skala Celcius:

$$T_C = 5/9 (T_F - 32) = 5/9 (77 - 32) = 25^\circ\text{C}$$

G. TERMOMETRI RESISTANSI PLATINUM

Walaupun termometer gas disediakan untuk temperatur termodinamika, tetapi termometer gas ini tidak praktis dipakai dan tidak cocok untuk banyak aplikasi. Termometer yang lebih praktis adalah termometer resistansi platinum, yang lebih dapat diproduksi ulang, lebih mudah dalam penggunaan dan memberikan jangkauan yang lebih lebar daripada termometer gas. Termometer resistansi platinum ini merupakan peralatan sekunder dari termometer gas, karena banyak pernyataan yang mendeskripsikan resistansi listrik sebagai fungsi dari kandungan temperatur tidak diketahui, ketergantungan termometer menjelaskan bahwa kita tidak dapat menghitung dari prinsip pertama.

Jika termometer resistansi ada dalam bentuk yang panjang, kawat yang baik, ini akan selalu membelit konstruksi bingkai yang tipis sehingga mencegah regangan yang berlebihan ketika kawat berkonstraksi karena pendinginan. Dalam keadaan khusus ini, kemungkinan kawat akan membelit atau melekat pada material di mana temperatur akan diukur. Pada tingkat temperatur yang sangat rendah, termometer resistansi sering kali terdiri atas komposisi karbon kecil resistor radio atau sebuah kristal germanium, yang dibubuhi arsenik dan ditutup dalam kapsul yang berisi helium. Ini mungkin akan ditempel di permukaan zat yang temperaturnya akan diukur atau ditempatkan di lubang bor.

Sirkuit pengukuran resistansi bisa dibagi menjadi dua grup yakni: tipe *potentiometric*, di mana pada saat seimbang terlihat tidak ada arus DC yang mengalir di penunjuk voltase, dan pada rangkaian jembatan saat seimbang arus bolak balik (AC) dapat diabaikan. Sampai akhir tahun 1960-an, rangkaian jembatan tidak diaplikasikan pada penentuan standar temperatur. Kemudian, 2 faktor ini mengubah situasi tersebut. Pertama, terjadi perkembangan pembagi voltase induksi atau *ratio transformer*, pada rangkaian jembatan. Kedua, terjadi kemajuan pada elektronik, yang memproduksi *lock-in* amplifier dengan sensitifitas yang tinggi dan dengan karakteristik sinyal terhadap gangguan yang baik. Sistem *self-balancing* yang rumit juga telah tersedia.

Termometer resistansi platinum dapat digunakan untuk pekerjaan yang sangat akurat dengan kisaran 13,8033 K sampai 1234,93 K (-259,3467°C sampai 961,78°C). Pengujian instrumen meliputi pengujian $R'(T)$ pada bermacam-macam definisi temperatur yang diketahui dan gambaran hasilnya

dengan sebuah formula empirik. Pada kisaran yang terbatas, persamaan kuadrat berikut selalu dipakai:

$$R'(T) = R'_{TP} (1 + aT + bT^2) \quad (1.18)$$

Di mana $R'(T)$ adalah resistansi kawat platina pada temperatur T , R'_{TP} adalah resistansi kawat platina ketika dikelilingi air pada titik tripel, serta a dan b konstanta. Untuk menghindari kebutuhan akan pengukuran resistansi dengan ketepatan yang absolut, pengujian termometer selalu dalam perbandingan $R'(T)/R'_{TP}$, yang dikenal sebagai $W(T)$. Dengan demikian, sebagai akibatnya resistivitas diukur daripada resistansinya. Manfaat lain adalah $W(T)$ relatif tidak sensitif terhadap efek dari regangan atau kontaminasi kawat.

Contoh

Resistansi kawat Platinum 11000 Ω pada titik es, 15247 Ω pada titik uap, dan 28887 Ω pada titik sulfur (445 $^{\circ}\text{C}$).

(a) Tentukan konstanta – konstanta a dan b dari persamaan:

$$R'(T) = R'_0 (1 + aT + bT^2),$$

(b) buatlah grafik R' terhadap T dalam rangkuman $^{\circ}\text{C}$ sampai dengan 660 $^{\circ}\text{C}$.

Penyelesaian:

(a) Titik es = 0 $^{\circ}\text{C}$, maka $R' = 11000 \Rightarrow 11000 = R'_0 (1 + a(0) + b(0)^2)$

..... (i)

Titik uap = 100 $^{\circ}\text{C}$, maka $R' = 15247 \Rightarrow 15247 = R'_0 (1 + a(100) + b(100)^2)$ (ii)

Titik es = 445 $^{\circ}\text{C}$, maka $R' = 28887 \Rightarrow 28887 = R'_0 (1 + a(445) + b(445)^2)$ (iii)

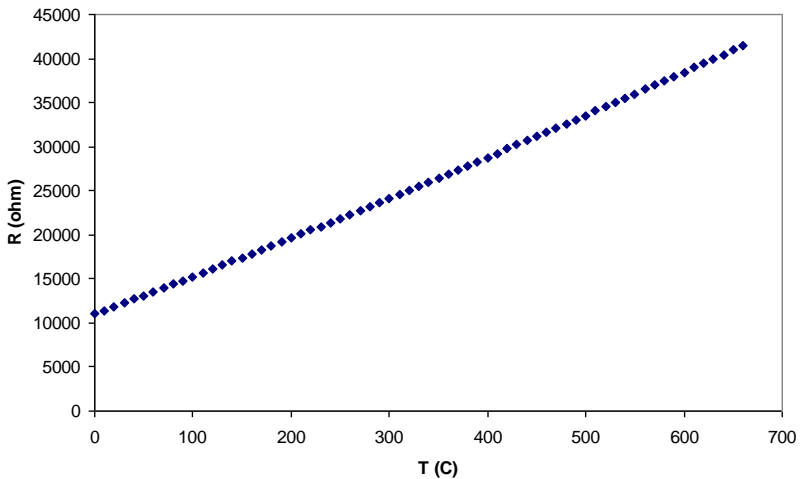
Persamaan (i), (ii), dan (iii) telah menjadi persamaan linear dengan 3 variabel yang tidak diketahui yakni R'_0 , a , dan b sehingga solusi dari persamaan ini menjadi unik. Dari persamaan (i) dengan mudah didapat $R'_0 = 11000$.

Dari persamaan (ii) dan (iii) dengan mensubstitusikan $R'_0 = 11000$, maka dengan mudah pula kita dapatkan: $a = 3.8 \times 10^{-3}$ dan $b = 6 \times 10^{-7}$

(b) Persamaan umum pada soal (a) adalah

$$R(T) = 11000 (1 + 3.8 \times 10^{-3} T + 6 \times 10^{-7} T^2)$$

maka, grafiknya adalah:



H. TERMOMETRI RADIASI

Pyrometry optik, *pyrometry* radiasi, *pyrometry* infra merah, dan *pyrometry* spektrum atau total radiasi adalah beberapa metode termometri yang didasarkan pada pengukuran radiasi panas, atau juga disebut radiasi benda hitam.

Pada termometri radiasi, berbeda dengan termometri resistansi, kita menggunakan persamaan yang telah ditetapkan yakni hukum radiasi Planck. Hukum ini menghubungkan temperatur termodinamika dengan pengukuran radiasi spektrum. Radiasi panas yang ada di dalam ruang tertutup (*blackbody radiation*) bergantung hanya pada temperatur dinding dan bukan karena bentuk dan komposisinya, membuktikan bahwa dimensi ruang harus lebih luas daripada panjang gelombang radiasi panas. Radiasi yang keluar dari lubang kecil di ruang tertutup tersebut terganggu karena adanya lubang. Dengan desain yang hati-hati, gangguan ini dapat diminimalkan, sehingga keseimbangan radiasi benda hitam dapat diukur dan pada prinsipnya, temperatur termodinamika dapat diukur dengan sangat tepat dengan termometri radiasi.

Termometer radiasi yang disebut *pyrometer* telah dikembangkan untuk pengukuran temperatur tinggi (lebih besar dari sekitar 1100°C), dan memiliki manfaat sebagai termometer non kontak. *Pyrometers* optik mengukur

temperatur objek dengan membandingkan radiasi tampak dari objek panas di atas panjang gelombang yang sempit dengan radiasi dari standar, lebih disukai menggunakan detektor photoelektrik untuk pengukuran daripada mata manusia. Koreksi untuk pancaran sumber harus digunakan untuk menentukan temperatur. Pyrometer total radiasi mengukur semua spektrum gelombang elektromagnetik termasuk radiasi sinar merah dari objek, untuk menentukan temperatur. Pyrometer total radiasi kurang akurat daripada pyrometer optik, tetapi dapat mengukur temperatur yang lebih rendah termasuk titik tripel air.

I. TERMOMETRI TEKANAN UAP

Termometri tekanan uap jenuh biasa digunakan untuk mengukur temperatur dengan kisaran antara 0,3 K sampai 5,2 K, karena keefektifan dan kemudahan tipe pengukuran ini. Substansi termometri ini adalah keseimbangan uap dengan cairan atau dari 2 isotop helium: ^3He atau ^4He . Tekanan uap Helium merupakan parameter termometrik, karena hal ini bergantung hanya pada parameter fisis dari elemen murni dan dapat diproduksi setiap saat, tidak memerlukan penambahan alat, dan relatif mudah untuk melakukan pengukuran dengan ketelitian yang cukup pada jangkauan temperatur.

Jangkauan yang sering digunakan pada skala tekanan uap air ^4He adalah kira-kira 1,0K (karena variasi yang kecil dari tekanan dengan temperatur dan kekomplekan akibat sifat *fluida berat*) sampai 5,2 K (karena cairan tidak ada di atas temperatur titik kritis). Kisaran untuk skala ^3He adalah dari kira-kira mulai 0,30 K (karena tekanan sedikit menyulitkan pengukuran) sampai 3,32 K (titik kritis).

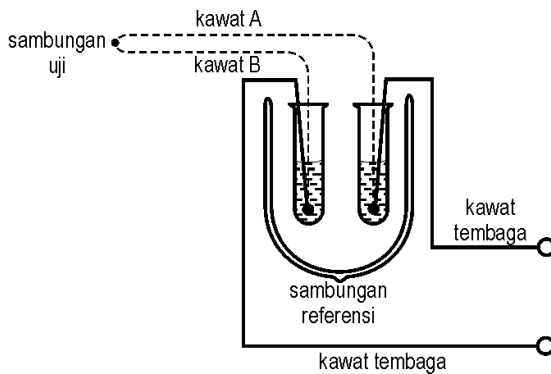
J. THERMOKOPEL

Diagram skematik dari termokopel ditunjukkan pada Gambar 1.15, di mana temperatur untuk pengukuran ditempatkan pada titik tes. Gaya termal elektromotif (emf) muncul pada titik di mana kawat *A* dan kawat *B* disatukan. Dua kawat termokopel dihubungkan dengan kawat tembaga yang ditempatkan pada titik referensi, yang dipertahankan pada temperatur mencairnya es.

Termokopel dikalibrasikan dengan mengukur emf termal pada titik tes dengan variasi temperatur yang diketahui, titik referensi tetap dijaga pada temperatur 0°C. Hasil pengukuran secara umum selalu dapat digambarkan dengan persamaan pangkat 3, yaitu:

$$\varepsilon = c_0 + c_1\theta + c_2\theta^2 + c_3\theta^3 \tag{1.19}$$

Di mana ε adalah emf termal, dan konstanta c_0 , c_1 , c_2 dan c_3 adalah berbeda tiap thermokopel. Dengan kisaran temperatur yang terbatas, persamaan kuadrat cukup dipakai. Kisaran temperatur pada thermokopel bergantung pada material penyusun. Tipe thermokopel K, terbuat dari kawat krom (90% Ni dan 10% Cr) dan kawat alumel (95% Ni, 2% Al, 2% Mn dan 1% Si) dan memiliki kisaran temperatur antara -270°C sampai dengan 1372°C.



Gambar 1.15. Termokopel kawat A dan B dengan titik referensi, terdiri dari 2 kawat tembaga, siap untuk dihubungkan dengan pengukur atau rangkaian monitor.

Manfaat termokopel adalah cepat menjadi keseimbangan termal dengan sistem yang temperaturnya diukur, karena massanya kecil. Selanjutnya, emf termokopel dapat menyesuaikan ke rangkain listrik, yang memonitor dan mengatur temperatur di banyak industri, tungku perapian, oven, dan unit pendingin. Kelemahannya adalah ketidaktepatan sebesar 0,2 K, 5 sampai 10 kali lebih besar daripada ketidaktepatan termometer resistansi platina pada temperatur tinggi. Oleh karena itu, termokopel tidaklah lama digunakan sebagai standar termometer di Skala Temperatur Internasional tahun 1990.

K. SKALA TEMPERATUR INTERNASIONAL TAHUN 1990 (ITS-90)

Komite berat dan Ukuran Internasional perhatian terhadap dua skala: *pertama* adalah skala termodinamika teori, *kedua* adalah pada waktu tertentu, skala temperatur praktis. Penggunaan termometer gas volume-konstan untuk pengujian rutin atau untuk pengukuran rutin temperatur termodinamika tidaklah praktis. Pada tahun 1927, skala temperatur praktis internasional pertama diadopsi untuk menyediakan alat pengujian yang cepat dan mudah untuk instrumen industri dan ilmu pengetahuan. Skala temperatur praktis telah direvisi atau di rubah sejak tahun 1948, 1960, 1968, 1976, dan 1990.

Skala Temperatur Internasional 1990 terdiri dari satu perangkat definisi pengukuran titik tetap yang utama dengan termometer gas, dan satu perangkat prosedur penambahan antara titik-titik tetap dengan menggunakan termometer kedua. Walaupun ITS-90 tidak diharapkan untuk menggantikan skala termodinamika Kelvin, tetapi disusun untuk menyediakan perkiraan terdekat dengan perbedaan antara skala temperatur praktis T_{90} dan skala temperatur termodinamika Kelvin T dengan pendekatan pengukuran dicapai tahun 1990.

Dengan menggunakan termometer standar dengan cara ini, maka kita secara eksperimen dapat menentukan titik – titik referensi yang lain untuk pengukuran temperatur yang dinamakan titik-titik tetap. Kita membuat daftar titik-titik tetap yang disesuaikan untuk referensi eksperimen di dalam Tabel 1.4. Temperatur tersebut dapat dinyatakan pada skala Celcius dan skala Kelvin.

Batas temperatur terendah dari ITS-90 adalah 0,65K, di bawah temperatur ini skala tidak memenuhi persyaratan standarisasi termometer, tetapi penelitian berlanjut dengan tujuan untuk memilih termometer referensi. Variasi interval temperatur dari ITS-90 dan termometer disajikan sebagai berikut.

1. Dari 0,65 K sampai 5,0 K. Antara 0,65 K dan 3,2 K, ITS-90 menetapkan hubungan tekanan temperatur uap ^3He dan antara 1,25K dan 2,1768 K (titik λ) dan antara 2,1768K dan 5,0K dengan hubungan temperatur tekanan uap ^4He .
2. Dari 3,0 K sampai 24,5561 K antara 3,0 K dan 24,5561 K, ITS-90 menetapkan dengan ^3He atau ^4He termometer gas volume konstan.

3. Dari 13,8033 K sampai 1234,93 K antara 13,8033 K dan 1234,93 K (-259,3467°C sampai 961,78°C), ITS-90 menetapkan rasio resistansi $W(T)$ dari termometer resistensi platina menggunakan titik tetap spesifik yang ada di Tabel 1.4 dan dengan fungsi referensi dan fungsi penyimpangan dari rasio resistansi antara titik tetap sebelas subinterval telah ditetapkan untuk mengakomodasi kebutuhan penelitian yang bervariasi.
4. Di atas 1234,93 K. Pada temperatur di atas 1234,93 K (961,78°C), ITS-90 menetapkan dengan pirometer optik menggunakan rasio konsentrasi spektrum dari radiasi benda hitam menggunakan perhitungan hukum radiasi Planck. Hanya ada satu referensi temperatur yang dibutuhkan bagi pirometer: titik beku emas, titik beku perak dan titik beku tembaga.

Sebelum ITS-90 diadopsi, thermokopel menjadi termometer standar untuk temperatur tinggi. Tetapi kemudian diganti karena kurang akurat. Interval termometer resistensi platina di perpanjang/dinaikkan untuk membuat batas paling baru, dan pirometer optik adalah standar termometer baru untuk temperatur yang tertinggi.

Tabel 1.4. Definisi titik-titik tetap ITS -90

No	Bahan	Keadaan Setimbang	Temperatur	
			T ₉₀ (K)	T ₉₀ (°C)
1	³ He dan ⁴ He	VP	3 - 5	-270.15 s/d -268.15
2	e-H ₂	TP	13.8033	-259.3467
3	e-H ₂ (atau He)	VP (atau CVGT)	≈ 17	≈ 256.15
4	e-H ₂ (atau He)	VP (atau CVGT)	≈ 20.3	≈ 252.85
5	He	TP	24.5561	-248.5939
6	O ₂	TP	54.3584	-218.7916
7	Ar	TP	83.8058	-189.3442
8	Hg	TP	234.3156	-38.8344
9	H ₂ O	TP	273.16	0.01
10	Ga	NMP	302.9146	29.7646
11	In	NFP	429.7485	156.5985
12	Sn	NFP	505.078	231.928
13	Zn	NFP	692.677	419.527
14	Al	NFP	933.473	660.323
15	Ag	NFP	1234.93	961.78
16	Au	NFP	1337.33	1064.18
17	Cu	NFP	1357.77	1084.62



LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Jelaskan beberapa sifat fisis materi yang bisa digunakan untuk membuat termometer!
- 2) Apa yang dimaksud dengan titik tripel air!
- 3) Termometer hambatan platina tertentu mempunyai hambatan sebesar $9,20 \Omega$ bila ujung termometer ditempatkan di dalam sebuah sel titik tripel, seperti sel dalam Gambar 1.11. Temperatur berapakah jika ujung tersebut ditempatkan di dalam sebuah lingkungan sehingga hambatannya menjadi $12,40 \Omega$?
- 4) Hitunglah pada temperatur berapakah skala Fahrenheit dan Celcius memberikan nilai numerik yang sama?
- 5) Resistansi dari kristal Germanium yang terdoping memenuhi persamaan:

$$\text{Log } R' = 4.697 - 3.917 \log T$$
 - a) Pada helium kriostat cair, resistensi yang terukur adalah 218Ω . Hitunglah temperatur cairan tersebut!
 - b) Buatlah garfik log-log R' terhadap T dari 200Ω – 30.000Ω

Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) Beberapa sifat fisis materi yang bisa digunakan untuk membuat termometer adalah:
 - a) perubahan massa jenis terhadap temperatur,
 - b) perubahan volume sebuah cairan,
 - c) perubahan panjang,
 - d) perubahan tekanan gas pada volume konstan,
 - e) perubahan volume gas pada tekanan konstan,
 - f) perubahan hambatan listrik,
 - g) perubahan warna sebuah kawat pijar,

2) Titik tripel air adalah titik di mana es, air cair dan uap air berada bersama-sama di dalam kesetimbangan. Keadaan ini dapat dicapai hanya pada tekanan tertentu dan keadaan ini adalah unik.

3) Dari persamaan (1.11),

$$\theta(R) = 273,16 \text{ K} \frac{R}{R_{TP}} = 273,16 \text{ K} \left(\frac{12,40}{9,20} \right) = 368,1 \text{ K}$$

4) Ingat $T_F = 32 + 9/5 T_C$, di mana syarat yang harus dipenuhi adalah $T_F = T_C$, maka

$$T_F - 9/5 T_F = 32$$

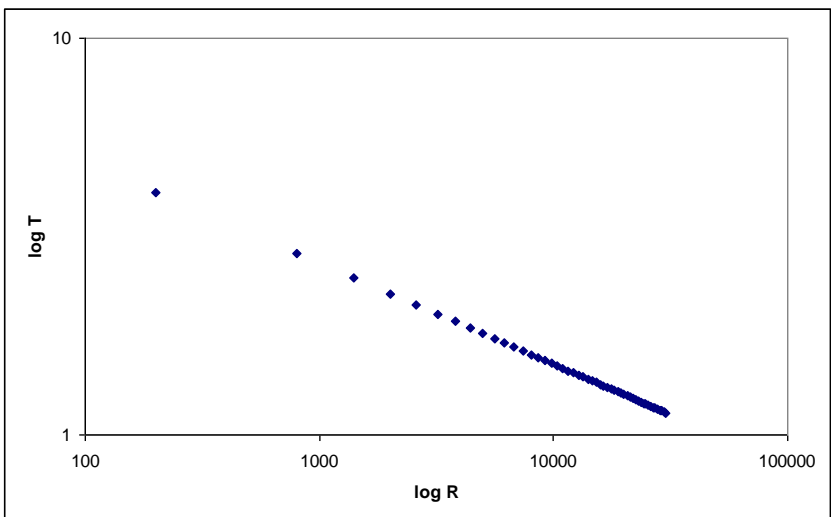
$$-4/5 T_F = 32 \text{ atau } T_F = T_C = -40^\circ$$

Jadi, pada nilai -40° temperatur skala Fahrenheit dan Celcius mempunyai nilai yang sama.

5) $\log R' = 4,697 - 3,917 \log T$ atau;

$$\log T = \frac{4,697 - \log R'}{3,917} \Rightarrow T = 10^{\frac{4,697 - \log(218)}{3,917}} = 10^{0,6} = 3,98 \text{ derajat}$$

Grafik log-log antara R' terhadap T adalah:



**RANGKUMAN**

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 diatermik. Hal ini diikhtiarkan dalam sebuah dalil yang disebut *hukum ke-nol termodinamika*; *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.*

Untuk menentukan sebuah skala temperatur secara empirik digunakan beberapa sistem *termometer* dan mengambil satu rangkaian aturan untuk menentukan sebuah hasil numerik bagi kumpulan temperatur dengan isothermalnya masing-masing. Untuk setiap sistem keseimbangan termal yang lain pada termometer, ditentukan angka yang sama untuk temperatur yang disebut dengan *titik tetap standar*. *Sifat termometrik* dan bentuk dari *fungsi termometrik* menentukan skala empirik temperatur. Ada banyak jenis termometer yang berbeda, dengan sifatnya masing-masing, dan terdapat 6 termometer modern.

Penentuan skala temperatur dan termometer standar telah dilakukan revisi yakni sesuai aturan ITS -90.

**TES FORMATIF 2**

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Gas yang dapat mendekati gas ideal dalam penerapannya dalam temperatur gas adalah
 - A. He
 - B. Air
 - C. O₂
 - D. H₂

- 2) Jika nilai limit dari rasio tekanan gas pada titik uap dan titik tripel dari air ketika volume gas dijaga konstan adalah 1,36, maka temperatur gas ideal pada titik uap adalah:
 - A. 371,50 K
 - B. 245,22 K
 - C. 328,42 K
 - D. 628,20 K

- 3) Sebuah termometer gas pada volume konstan mempunyai tekanan 33,331 kPa ketika ditempatkan di dalam sebuah sel titik triple. Jika termometer tersebut diletakkan di sebuah lingkungan yang mempunyai tekanan 51,190 kPa, maka temperatur lingkungan tersebut adalah
- 128,88 K
 - 260,47 K
 - 325,24 K
 - 419,52 K
- 4) Jika temperatur tubuh normal adalah 98,6 °F, maka dalam skala Celcius temperatur tubuh tersebut adalah
- 32 °C
 - 37 °C
 - 40 °C
 - 42 °C
- 5) Jika kita akan mengukur temperatur permukaan matahari, maka termometer yang tepat kita gunakan adalah termometer
- gas
 - termokopel
 - radiasi
 - resistansi
- 6) Jika termometer Celcius mengindikasikan temperatur sebesar 35 °C, maka temperatur dalam Fahrenheit adalah
- 216 °F
 - 142 °F
 - 95 °F
 - 34 °F
- 7) Jika temperatur ruangan menunjukkan 68 °F maka dalam skala *Centigrade* adalah
- 60
 - 52
 - 48
 - 20
- 8) Pada termometer alkohol dalam gelas, tinggi kolom alkohol adalah 10,70 cm pada 0°C dan panjang 22,85 cm pada 100°C. Jika tinggi kolom 16,70 cm, maka temperaturnya adalah
- 48 °C
 - 52 °C

- C. 65 °C
D. 90 °C
- 9) Temperatur di mana es dan air jenuh udara berada di dalam kesetimbangan pada tekanan atmosfer disebut
- A. Titik uap
B. Titik sublim
C. Titik anomali
D. Titik beku
- 10) Pada titik beku, maka temperatur Rankine menunjukkan:
- A. 0 R
B. 491,67 R
C. 273,15 R
D. 373,15 R

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 2 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 2.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali
80 - 89% = baik
70 - 79% = cukup
< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan modul selanjutnya. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 2, terutama bagian yang belum dikuasai.

Kunci Jawaban Tes Formatif

Tes Formatif 1

- 1) C Daerah antara sistem dengan lingkungan disebut batas sistem.
- 2) A Pendekatan makroskopis disebut juga pendekatan termodinamika klasik sedangkan pendekatan mikroskopis disebut juga pendekatan termodinamika modern/statistik. Termodinamika teknik merupakan salah satu cabang termodinamika.
- 3) B Menetapkan beberapa besaran untuk menjelaskan sistem merupakan sifat dari pandangan mikroskopis.
- 4) D Temperatur, tekanan dan panjang merupakan besaran yang dapat diukur sehingga merupakan contoh besaran makroskopis.
- 5) A Tidak mengandung asumsi khusus merupakan sifat dari makroskopis.
- 6) B Karakteristik yang menentukan sifat dari sistem disebut variabel.
- 7) D Balon udara, massa yang ada di dalamnya tidak mengalami perubahan, yang berubah hanya volumenya sehingga dikatakan sistem pada balon udara adalah sistem tertutup.
- 8) C Sistem termodinamika di mana tidak ada energi dalam bentuk apapun yang melintasi batasnya disebut sistem terisolasi.
- 9) A Pada sistem batang paramagnetik, besaran intensifnya adalah medan magnet.
- 10) B Proses isobarik adalah proses tekanan konstan, proses isokhorik adalah proses volume konstan, proses isothermik adalah proses temperatur konstan dan adiabatik adalah proses tidak ada energi dari luar yang masuk.

Tes Formatif 2

- 1) A Seperti pada Gambar 1.13, maka gas yang mendekati gas ideal adalah He
- 2) A Dari persamaan (1.13), $T = 273,16 K \lim_{P_{TP} \rightarrow 0} \left(\frac{P}{P_{TP}} \right) = (273,16) \times (1,36) = 371,50 K$
- 3) D $\theta(P) = 273,16 K \frac{P}{P_{TP}} = 273,16 K \left(\frac{51,190 \text{ kPa}}{33,331 \text{ kPa}} \right) = 419,52 K$
- 4) B $^{\circ}C = 5/9 (^{\circ}F - 32) = 5/9 (98,6 - 32) = 37 ^{\circ}C$
- 5) C Untuk temperatur tinggi, maka digunakan termometer radiasi
- 6) C $^{\circ}F = 9/5 ^{\circ}C + 32 = 9/5 (35) + 32 = 95 ^{\circ}F$
- 7) D *Centrigrade* sama dengan Celcius, maka $^{\circ}C = 5/9 (^{\circ}F - 32) = 5/9 (68 - 32) = 20^{\circ}C$
- 8) A $\frac{T_1}{T_2} = \frac{x_1}{x_2} \Leftrightarrow \frac{T}{100^{\circ}C} = \frac{(16,70 - 10,70)}{(22,85 - 10,70)}$ atau $T = 48 ^{\circ}C$
- 9) D Titik beku adalah temperatur di mana es dan air jenuh udara berada di dalam keseimbangan pada tekanan atmosfer.
- 10) B Titik beku = $0^{\circ}C = 273,15 K$
 $T_R = 9/5 T_K = 9/5 \times 273,15 = 491,67 R$

Glosarium

Assembly	sekelompok sistem yang sama yang terikat/terisolasi.
Batas sistem	Batas antara sistem dengan lingkungan.
Besaran ekstensif	variabel keadaan yang berbanding lurus dengan massa atau volume (ukuran) dari sistem.
Besaran intensif	variabel keadaan yang tidak bergantung dengan massa atau volume dari sistem.
Besaran spesifik	Perbandingan antara besaran ekstensif dengan massa.
Keadaan	Kondisi tertentu dari sistem termodinamika.
Kesetimbangan	Suatu sistem yang tidak mengalami perubahan keadaan.
Lingkungan	Benda lainnya di alam semesta di luar sistem.
Manometer	Alat ukur tekanan.
Proses	Perubahan sistem termodinamika dari keadaan seimbang satu menjadi keadaan seimbang lain.
Siklus	sistem yang menjalani rangkaian beberapa proses, dengan keadaan akhir sistem kembali ke keadaan awalnya.
sistem	Benda/sekumpulan benda atau daerah yang dipilih untuk dijadikan obyek analisis.
Sistem terbuka	Sistem di mana energi dan massa dapat keluar sistem atau masuk ke dalam sistem melewati batas sistem.
Sistem terisolasi	Sistem tertutup di mana tidak ada energi dalam bentuk apapun yang melintasi batasnya.
Sistem tertutup	Sistem di mana massa dari sistem yang dianalisis tetap dan tidak ada massa keluar dari sistem atau masuk ke dalam sistem, tetapi volumenya bisa berubah.
Termodinamika	ilmu tentang energi, yang secara khusus membahas tentang hubungan antara energi panas dengan kerja.
Tinjauan makroskopis	sifat termodinamis didekati dari perilaku umum partikel-partikel zat yang menjadi media pembawa energi.
Tinjauan mikroskopis	Pendekatan tentang sifat termodinamis suatu zat berdasarkan perilaku kumpulan partikel-partikel.
variabel	Karakteristik yang menentukan sifat dari sistem.

Celcius	Satuan temperatur , satuan $^{\circ}\text{C}$.
Fahrenheit	Satuan temperatur , satuan $^{\circ}\text{F}$.
Hukum ke-nol termodinamika	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.
Isotermal	suatu daerah di mana semua titik menggambarkan keadaan sebuah sistem berada pada keadaan kesetimbangan termal dengan keadaan sistem yang lain.
Kesetimbangan	Suatu sistem dengan koordinat X dan Y memiliki nilai tetap yang berarti konstan selama keadaan luar tidak berubah.
Kesetimbangan termal	Suatu sistem dengan koordinat X dan Y memiliki nilai temperatur yang tetap selama keadaan luar tidak berubah.
Kelvin	Satuan temperatur termodinamika.
Temperatur	sifat yang menentukan sistem tersebut memiliki atau tidak memiliki kesetimbangan termal dengan sistem lainnya.
Termometer	Alat yang digunakan untuk mengukur temperatur.
Titik tetap standar	Titik di mana semua termometer harus memberikan pembacaan yang sama untuk temperatur T.
Titik tripel air	Titik di mana es, air cair dan uap air berada bersama-sama di dalam kesetimbangan.

Daftar Pustaka

Carrington.G. (1994). *Basic Thermodynamics*. New York: Oxford Univ. Press.

Leonard, C.M. (1965). *Fundamental of Thermodynamics*. New Delhi: Prentice Hall of India.

Zemansky, M. W and Dittmann, R.H. (1981). *Heat and Thermodynamics- an intermediate text Book, 6th edition*. Tokyo: Mc Graw-Hill.