

Konsep dan Aturan Termodinamika

Prof. Dr. B. Suprpto Brotosiswojo



PENDAHULUAN

Untuk keperluan pembahasan kita tentang fisika statistik, ada baiknya kalau pada modul awal ini kita ulas sekali lagi sejumlah konsep serta aturan yang ditemui kalau kita menyimak perangai termal bahan-bahan alam. Seperti halnya ada cabang ilmu yang dinamakan elektrodinamika yang membahas perilaku kelistrikan, maka ada juga ilmu yang membahas perilaku termal bahan-bahan, lalu kita namakan termodinamika.

Aturan-aturan termodinamika sebagian diperoleh secara empirik dari hasil pengamatan eksperimen. Namun juga tidak kalah pentingnya upaya untuk memunculkan *konsep-konsep baru* yang memungkinkan perangai alam itu dapat diungkapkan secara kuantitatif. Sebagai ilmu yang tangguh fisika menuntut adanya kesesuaian antara hasil penalaran kita dengan hasil pengamatan dan pengukuran objek-objek alam, tidak hanya secara kualitatif, melainkan juga secara kuantitatif dengan derajat ketelitian yang setinggi mungkin dapat dicapai.

Ungkapan secara kuantitatif menuntut adanya perumusan tentang hubungan atau ketergantungan pelbagai sifat alam yang terkait, dalam bentuk *bahasa simbolik matematika*. Karena itu termodinamika juga tampil dalam bentuk rumus-rumus matematika, ada yang ungkapannya sederhana, dan ada pula yang tampak rumit. Rumus-rumus matematika tersebut merupakan *abstraksi* (ungkapan singkat) dari gejala dan perangai alam yang benar-benar ada. Karena itu yang kita perlukan bukan hanya mengerti bentuk rumusnya, atau tahu cara menerapkannya. Yang lebih utama adalah kita sanggup memaknai rumus-rumus matematika tersebut dalam kaitan dengan peristiwa alam yang direpresentasikannya.

Untuk benar-benar memahaminya kadang-kadang diperlukan cara pendekatan yang berbeda. Itulah yang ingin diwujudkan oleh modul pertama ini.

Pada Modul 1 ini, disajikan dalam dua kegiatan belajar. Kegiatan Belajar 1 (KB-1) membahas tentang suhu dan kalor. Sedangkan Kegiatan Belajar 2 (KB-2) membahas tentang entropi.

Tujuan umum mempelajari Modul 1 ini adalah mahasiswa dapat menerapkan dalam pembelajaran tentang konsep-konsep yang berkaitan dengan suhu dan kalor serta entropi.

Setelah mempelajari modul ini mahasiswa dapat:

1. menjelaskan pengertian suhu;
2. menjelaskan pengertian energi termal;
3. menghitung berbagai jenis suhu;
4. menjelaskan 4 tingkat wujud berurutan sesuai dengan rentangan suhunya;
5. menjelaskan volume, tekanan, dan suhu dalam termodinamika;
6. menjelaskan istilah besaran intensif dan besaran ekstensif;
7. menjelaskan energi bebas;
8. melukiskan proses quasi-statik dalam bentuk grafik;
9. menghitung besarnya perubahan entropi;
10. menjelaskan kalor sebagai salah satu bentuk energi;
11. menjelaskan energi bebas Helmholtz ;
12. menjelaskan fungsi energi bebas Gibbs;
13. menunjukkan gejala-gejala alam yang kaitan dengan waktu.

Agar Anda dapat berhasil dalam mempelajari modul ini maka berusaha secara sungguh-sungguh untuk belajar dan memahami pokok bahasan dan uraian materinya. Di samping itu juga Anda wajib mengerjakan semua soal-soal yang terdapat pada tes formatif. Kunci keberhasilan dalam mempelajari modul ini adalah pemahaman terhadap kalimat-kalimat dalam setiap paragraf, kemudian menghafal dan memahami kalimat kuncinya.

Selamat Belajar, Semoga Anda Berhasil!

Kegiatan Belajar 1

Suhu dan Kalor

A. SUHU DAN KALOR

Istilah suhu dan kalor pasti tidak asing bagi Anda. Tetapi ada baiknya kita mengajukan pertanyaan berikut.

1. Suhu

Pertama bagaimana caranya Anda menemukan bahwa suhu badan Anda adalah 37°C ? Ah, jawabnya mudah. Kita pasang termometer di bagian badan kita dan kita baca skalanya. Kalau air raksa pada termometer menunjuk pada angka 37 itu artinya suhu badan kita adalah 37 derajat Celsius dan kita anggap normal, kita tidak sedang demam. Sekarang juga ada termometer digital, yang tidak memperlihatkan kolom air raksa, langsung menampilkan tulisan angka 37.

Pertanyaan kedua, ada buku tentang astronomi menyebutkan bahwa suhu matahari adalah 6.000°C , dari mana kesimpulan itu diperoleh? Rasanya belum ada manusia yang pernah pergi ke matahari sambil membawa termometer untuk mengukur suhunya. Seandainya pun ada manusia yang pernah mengunjungi matahari (tentunya dengan perlengkapan pelindung yang tahan panas) termometernya pasti akan meleleh sehingga tidak lagi bisa menunjukkan angka 6000. Jadi jelas kesimpulan tersebut tidak diperoleh lewat bacaan termometer. Ada bahan bacaan lain yang digunakan, bukan tingginya kolom air raksa dalam termometer, melainkan spektrum cahaya matahari.

Pada pertanyaan pertama kita baca kolom air raksa lalu mengatakan suhunya 37°C . Pada pertanyaan kedua kita baca spektrum matahari lalu kita bilang suhunya 6.000°C . Jadi suhu itu apa? Air raksa atau spektrum?

Di sekolah kita juga belajar bahwa skala Celsius diperoleh dengan acuan bahwa air yang mendidih pada tekanan satu atmosfer suhunya diberi angka 100, sedangkan kalau air itu mulai membeku jadi es, suhunya diberi angka 0. Apa yang terjadi di antaranya diberi rentangan angka antara 0 dengan 100. Mestinya kita juga boleh bertanya yang kita sebut suhu, yang mau kita beri angka dari 0 hingga 100 itu apanya? Tentunya ada yang menjawab ya airnya. Jawaban itu konkret dan masuk akal. Tetapi waktu kita bilang suhu badan

kita diberi angka 37 oleh termometer, bukankah badan kita bukan air, begitu juga termometer kita juga bukan air. Lalu apa pengertian suhu dalam hal ini?

2. Kalor

Sekarang tentang istilah kalor. Ini mungkin lebih mudah. Tenaga listrik yang saat ini merupakan keperluan sehari-hari dalam kehidupan masyarakat itu ada yang dibangkitkan dari air terjun yang memutar turbin. Putaran turbin tersebut menghasilkan energi mekanik yang dapat diubah menjadi energi listrik lewat sebuah mesin pengubah. Jadi ada pusat-pusat tenaga listrik yang disebut Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA). Tetapi juga dikenal pembangkit tenaga listrik yang memanfaatkan panas bumi, nama asingnya *geothermal*. Kalau air terjun merupakan sumber tenaga karena potensial gravitasi, maka objek yang suhunya lebih tinggi juga merupakan sumber tenaga. Istilah kalor kita gunakan untuk menunjuk *satuan energi* yang bentuknya bukan listrik, bukan mekanik, bukan cahaya, bukan magnetik, bukan kimiawi, bukan nuklir...dan seterusnya. tetapi *terkait dengan besaran yang kita sebut suhu*. Energi yang menyebabkan air 1 liter suhunya naik dengan satu derajat Celsius, kita sebut energi satu kilokalori (salah satu satuan kalor). Bahan yang suhunya lebih tinggi dari suhu lingkungan kita, merupakan sumber energi. Kereta api jaman dahulu menggunakan mesin uap sebagai sumber gerakannya. Uap air itu dipanaskan dalam tungku mesin lokomotif dan uapnya digunakan sebagai energi penggerak roda-rodanya. Ada kalanya bahan bakar yang digunakan adalah kayu, ada kalanya bahan bakar yang digunakannya batu bara.

3. Suhu Absolut

Kita juga sudah belajar tentang penggunaan skala suhu yang lain, bukan lagi derajat Celsius melainkan derajat Kelvin. Rumusnya mudah, derajat Kelvin = derajat Celsius ditambah angka 273. Apa sekedar untuk ganti-ganti saja ? Ada alasan yang sangat mendasar, yaitu suhu 0°K atau -273°C itu *batas yang tidak pernah dapat dicapai*, hanya dapat didekati sedekat mungkin. Oleh sebab itu skala derajat Kelvin sering disebut **skala suhu absolut**, dan digunakan banyak dalam merumuskan aturan-aturan termodinamika. Hal ini sesungguhnya mirip dengan sifat alam lainnya terkait dengan teori relativitasnya Einstein, yaitu bahwa objek alam yang punya massa tidak akan pernah dapat bergerak melampaui kecepatan cahaya, $c \approx 300\,000$ km/detik. Hal itu terjadi karena massa lembam yang menghambat kecepatan itu

nilainya bertambah jika kecepatannya bertambah, rumusnya jika m_0 massa ketika objek itu diam ($v = 0$), maka massa lembam ketika objek tersebut

kecepatannya v menjadi $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$ nilainya makin membesar dengan

kecepatan v yang semakin besar, dan menjadi tak hingga besarnya ketika v mendekati c . Artinya kecepatan v yang dekat dengan c itu tidak lagi dapat ditambah.

Seperti yang akan dibahas kemudian, proses mendekati suhu absolut $T = 0^\circ\text{K}$ juga terjadi serupa. Ada besaran yang dinamakan kapasitas panas, yaitu banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu dengan satu derajat. Besaran ini ternyata makin mengecil nilainya jika suhu T makin dekat dengan 0°K . Ketika T sangat dekat dengan nilai 0, besaran tersebut menjadi begitu kecilnya sehingga tambahan kalor yang sangat sedikit pun sudah cukup untuk menaikkan suhunya. Akibatnya suhu 0°K itu tidak pernah dapat dicapai.

B. FUNGSI-FUNGSI TERMODINAMIKA

Ini pun bukan barang baru bagi Anda, tetapi tetap ada baiknya kita bahas, khususnya makna fisika yang terkait dengan besaran-besaran itu.

1. Empat Tingkat Wujud/Fasa

Kita mengenal beberapa *fasa*: ada yang padat yang bentuknya tidak mudah berubah; ada fasa cair yang bentuknya menyesuaikan diri dengan tempatnya tetapi punya permukaan atas yang pada umumnya praktis datar horizontal; ada fasa gas yang bentuknya selalu menyesuaikan dengan tempatnya dan tidak memiliki permukaan atas yang bebas. Fasa-fasa itu pun diatur oleh parameter suhu. Fasa padat ditemui umumnya pada suhu rendah, fasa cair pada suhu lebih tinggi, fasa gas pada suhu yang lebih tinggi lagi. Sebenarnya masih ada lagi fasa yang jarang disebut yang terjadi pada suhu yang jauh lebih tinggi lagi, namanya fasa *plasma*. Selain tentunya mirip dengan fasa gas, tetapi ditambah lagi sifat lain, yaitu sebagian dari elektron-elektron yang biasanya terikat pada atom atau molekul mulai lepas dari inti atom atau molekul tadi. Pada fasa plasma ini ada dua jenis objek, yang masing-masing berjalan sendiri-sendiri, yaitu objek yang bermuatan positif

(ion-ion) dan objek yang bermuatan negatif (elektron-elektron). Fisika plasma dibahas biasanya berkaitan dengan upaya pengendalian reaksi termonuklir, yaitu bergabungnya dua inti hidrogen, deuterium atau tritium membentuk inti Helium. Proses tadi hanya terjadi pada fasa plasma semacam ini, karena elektron-elektron tidak lagi menghalangi inti-inti atom untuk bersentuhan satu sama lain, sehingga reaksi inti dapat berlangsung. Untuk keperluan kita sekarang tentu saja fasa plasma itu tidak kita bahas lebih lanjut.

2. Gas

Di antara fasa padat, cair, dan gas, yang punya paling banyak parameter untuk diubah-ubah adalah fasa gas. Jadi pembahasan termodinamika biasanya difokuskan pada fasa ini, tentunya tanpa mengabaikan fasa padat dan cair. Alasan lain adalah bahwa partikel (atom, molekul, dan sebagainya) sebagian besar waktunya bergerak secara bebas, jadi mekanikanya sangat sederhana. Belakangan juga termodinamika untuk zat padat ikut digarap dengan alasan bahwa partikel pembangunnya terletak secara teratur pada kisi-kisi yang berulang. Dengan demikian mekanikanya juga menjadi lebih mudah untuk dibahas.

Yang sudah Anda pelajari dari fasa gas biasanya menggunakan parameter volume V , tekanan P , dan suhu T ; ketiganya merupakan besaran-besaran yang dapat diukur. Masih ada besaran lain yang juga perlu dipertimbangkan, yaitu materi yang ada dalam gas itu, misalnya banyaknya partikel (atom atau molekul). Sudah barang tentu jika kita nanti sudah menghitung dengan angka-angka, jumlah partikel yang ada dalam gas tersebut akan ikut berperan. Kadang-kadang untuk menyederhanakan pembahasan kita, diambil kesepakatan bahwa kita menggarap gas dengan jumlah partikel tertentu N_0 yaitu bilangan Avogadro yang nilainya $= 6,0226 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Dengan tiga buah parameter P , V , dan T , dibuat ruang dimensi-3 (P, V, T), sehingga kondisi gas kita dilukis sebagai sebuah titik di ruang tersebut. Pada gas yang konsentrasi partikelnya cukup renggang, sering disebut *gas ideal*, hasil pengukuran perangnya menunjukkan adanya saling ketergantungan antara ketiga variabel tadi. Bentuk rumusnya seperti Anda sudah hafal adalah $PV = NkT$. Di sini N menunjuk jumlah partikel dalam gas itu, sedangkan k merupakan konstanta yang dikenal sebagai tetapan Boltzmann. Maknanya, dalam kondisi keseimbangan untuk gas dengan

jumlah partikel N yang nilainya tertentu, lokasi titik yang mencerminkan kondisi gas kita hanya mungkin terletak pada **sebuah permukaan dalam ruang (P, V, T) itu yang membuat nilai $\left(P \frac{V}{T}\right)$ konstan.** Persamaan

$\left[\left(P \frac{V}{T}\right) - Nk\right] = 0$ kita sebut **persamaan keadaan** untuk gas ideal.

Tentunya termodinamika juga mengenal besaran lain, seperti misalnya *energi-internal* yang lazimnya diberi lambang U , yaitu jumlah energi yang dikandung oleh gas tersebut sebagai akibat dari partikel-partikelnya yang bergerak dan dengan demikian punya energi kinetik. Ada juga besaran yang disebut *kapasitas panas*, yaitu jumlah kalor diperlukan untuk menaikkan suhu gas dengan satu derajat. Masing-masing besaran termodinamika tersebut tentunya juga dapat bergantung pada kondisi gas, artinya nilai P , V , dan T .

3. Besaran Intensif dan Besaran Ekstensif

Ada besaran yang disebut *intensif* dan ada yang disebut *ekstensif*. Itu terkait dengan ketergantungannya terhadap jumlah partikel yang ada dalam gas yang kita bicarakan. Energi internal U nilainya sebanding dengan jumlah partikel N , dan masuk dalam kategori *besaran ekstensif*. Kalau N dinaikkan menjadi dua kalinya, maka U otomatis juga naik dua kalinya. Tetapi besaran suhu T dan tekanan P masuk dalam kategori *besaran intensif*. Bagaimana dengan volume V ? Lazimnya itu dimasukkan dalam kategori *besaran ekstensif*, maksudnya pada suhu T yang tetap, untuk mendapatkan tekanan P yang sama, jika jumlah partikelnya dua kali lipat, volumenya juga harus dua kali lipat.

4. Energi dan Energi Bebas

Kadang-kadang aneh juga penggunaan istilah-istilah itu. Menurut aturan fisika wujud energi dapat berubah dari energi mekanik menjadi energi listrik seperti pada turbin PLTA, atau juga sebaliknya berubah dari energi listrik menjadi energi mekanik seperti misalnya motor-listrik. Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa selama proses perubahan bentuk energi semacam itu, jumlah energi totalnya akan konstan. Bahan bakar minyak (BBM) itu digunakan sebagai wujud sumber energi yang mudah untuk diubah menjadi energi listrik, energi kalor, energi mekanik, dan sebagainya. Jadi konsumsi BBM itu hanya mengubah bentuk energi yang satu menjadi energi yang lain.

Menurut hukum kekekalan energi kita tidak kehilangan apa-apa. Tetapi mengapa orang ribut-ribut dengan soal krisis energi? Mestinya tak masuk akal kalau hukum kekekalan energi itu berlaku! Jadi salah satu pasti ada yang salah.

Termodinamika selain mengenal energi internal U , juga mengenal fungsi yang dinamakan **Fungsi Energi Bebas**. Ada dua jenisnya, yang satu disebut Fungsi Energi Bebas Helmholtz (*Helmholtz Free Energy*), yang satunya lagi dikenal dengan nama Fungsi Energi Bebas Gibbs (*Gibbs Free Energy*). Disebut energi bebas, yang nilainya berbeda dengan energi internal U , disebabkan karena tidak semua energi yang dikandung dalam U itu *bebas* untuk digunakan. Energi bebas Helmholtz, biasanya diberi lambang F , nilainya

$$F = U - TS \quad [1-1]$$

Maknanya, di antara energi internal U yang dikandung oleh gas kita, ada sebagian yang *tidak bebas untuk dipakai*, yaitu sebesar TS di mana S adalah fungsi entropi. Hal semacam itu biasa terjadi, misalnya menurut Einstein sebuah objek yang massanya = m mengandung energi yang besarnya mc^2 , di mana c adalah kecepatan jalar cahaya. Bayangkan kalau Anda menghitung berapa besar energi yang terkandung pada sepotong kapur tulis besarnya lebih dari cukup untuk konsumsi sebuah pabrik selama seminggu. Tetapi nyatanya sepotong kapur itu tidak begitu saja bisa diambil semua energinya. Jadi dalam kehidupan sehari-hari energi yang benar-benar tersedia itu maksimum hanyalah yang kita sebut energi bebas saja.

5. Proses Quasi-Statik

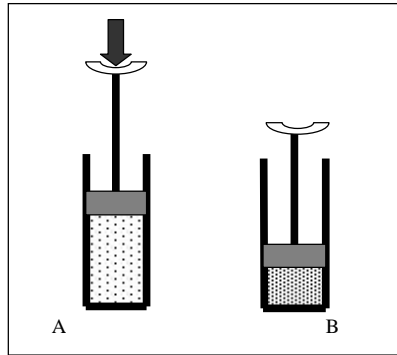
Suatu proses termodinamika tentunya dapat mengubah nilai koordinat P, V , dan T , sehingga lokasi titik yang mewakili kondisi gas kita berpindah tempat. Kalau kita simak setahap demi setahap titik tersebut berubah dari (P_0, V_0, T_0) ke (P_1, V_1, T_1) , ke (P_2, V_2, T_2) , ke dan seterusnya. Seperti pada dinamikanya gerak benda, deretan titik-titik tersebut melukis sebuah lintasan dalam ruang (P, V, T) . Bentuk lintasannya bergantung pada mekanisme yang menyebabkan proses tersebut. Sebagai ilustrasi barangkali baik kalau kita mengambil contoh yang sederhana.

Di sisi kiri ini dilukis gambar dari dua situasi A dan B yang melukiskan gas yang sama pada kondisi yang berbeda. Pada kondisi A volumenya lebih besar dibandingkan dengan ketika ada di kondisi B.

$$V_A > V_B$$

Pada suhu T yang sama, tentunya tekanan P_A lebih kecil dari P_B dan berlaku hubungan

$$P_A V_A = P_B V_B$$



Gambar 1.1.
Proses Quasi Statik

Lokasi (P_A, V_A, T) dan (P_B, V_B, T) dalam ruang (P, V, T) tentu saja berbeda.

Yang akan kita persoalkan sekarang adalah bagaimana proses dari A ke B berlangsung. Lintasannya bukan sekedar garis lurus yang menghubungkan (P_A, V_A, T) dan (P_B, V_B, T) . Jika proses dari A ke B dilakukan dengan memberi **beban tetap** pada piring yang ada di bagian atas maka usaha yang penutup sehingga gas tertekan dengan **pekanan** $P_C > P_B > P_A$, maka kerja luar yang dilakukan untuk mengubah kondisi A ke kondisi B adalah

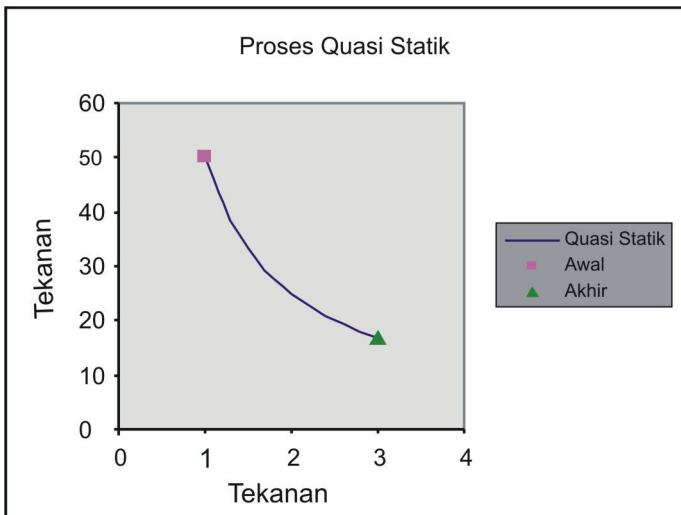
$$W_I = P_C \cdot (V_A - V_B) \quad [1-2]$$

Akan tetapi jika proses mengubah dari kondisi A ke kondisi B berjalan dengan memberi tambahan tekanan **sedikit saja** lebih besar dari P_A misalnya $(P_A + \delta P)$ maka volume akan berubah menjadi $(V_A - \delta V)$, dan dengan sendirinya tekanannya berubah menjadi lebih besar sedikit. Tahap berikutnya dilakukan hal yang sama dengan tekanan sedikit lebih tinggi. Begitu seterusnya sampai akhirnya tiba pada kondisi B. Proses yang kedua ini menggunakan kerja luar W_{II} yang lebih sedikit dibandingkan dengan cara

pertama. Proses mengubah dari kondisi A ke kondisi B dengan cara ini disebut **proses yang quasi-statik**.

Bisa disimpulkan bahwa mengubah dari suatu kondisi (P_A, V_A, T) ke kondisi lain (P_B, V_B, T) melibatkan besaran yang kita namakan kerja luar W , tetapi besarnya kerja luar itu bergantung dengan caranya kita melakukan proses pengubahan itu. Cara yang disebut quasi-statik melibatkan kerja luar yang nilainya paling kecil.

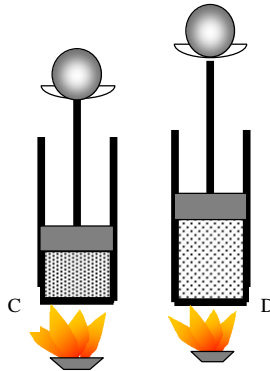
Jika yang kita bahas pada contoh di atas adalah gas ideal, maka dari hasil pengukuran secara empirik, pada suhu T yang sama kita dapat melukiskan proses quasi-statik dari kondisi A ke kondisi B sebagai kurva dalam bidang (P, V).



Gambar 1.2.
Proses Quasi Statik

Kurvanya mengikuti aturan bahwa P dikalikan V untuk titik-titik yang mencerminkan kondisi di antara awal A dan akhir B selalu bernilai konstan.

Proses yang terjadi pada suhu T yang konstan sering disebut proses *isotermik*.



Gambar 1.3.

Tentunya kita juga dapat melakukan proses dari suatu kondisi C ke kondisi lain D pada tekanan P yang sama. Artinya kondisi C : (P, V_C, T_C) kondisi D : (P, V_D, T_D) , dengan T_D lebih besar nilainya daripada T_C . Proses dengan tekanan tetap biasanya disebut *isobarik*. Prosesnya tentu melibatkan masuknya energi dari luar, misalnya dengan memberikan tambahan kalor lewat pemanasan. Tetapi sekali lagi ada banyak cara untuk mengubah dari kondisi C ke kondisi D.

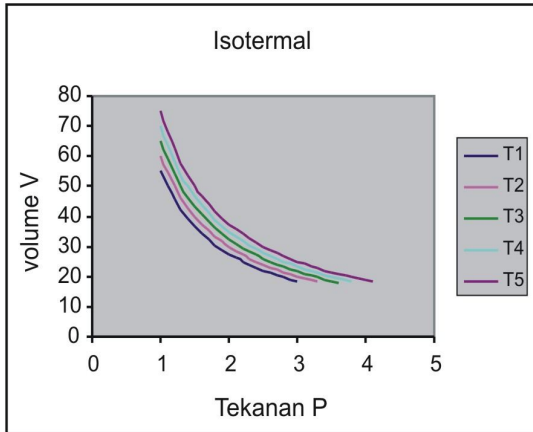
Ada yang asal memanaskan saja, ada juga yang prosesnya quasi-statik. Yang quasi-statik itu akan memasukkan kalor setahap demi setahap, sehingga sifat $PV = NkT$ terpenuhi untuk setiap tahap. Pada gambar nilai P yang tetap bisa dijamin dari beban yang diletakkan di atas piringan. Proses quasi-statik mengikuti hubungan $V = \left(\frac{Nk}{P}\right)T$ berubah secara linier dengan nilai T .

Tentu saja ada proses sederhana lainnya, yaitu ketika kita mengubah suhu pada volume V yang tetap. Dari hubungan $PV = NkT$, dengan nilai V yang konstan tekanan P akan berubah mengikuti aturan $P = \left(\frac{Nk}{V}\right)T$. Artinya P akan berubah secara linier mengikuti perubahan nilai suhu absolut T . Lukisan grafiknya dapat diungkap dalam bidang (P, T) , bentuknya linier mirip dengan proses isobarik.

Kumpulan lintasan quasi-statik isotermal pada suhu-suhu T yang berbeda tentunya akan membentuk *sebuah permukaan* dalam ruang (P, V, T) . Untuk wilayah gas yang renggang sehingga hubungannya dapat dinyatakan

dalam bentuk gas ideal, kita dapat membuat proyeksi permukaan tersebut pada bidang (P,V). Bentuknya seperti lukisan grafik di sebelah ini

$$T1 < T2 < T3 < T4 < T5.$$



Gambar 1.4.
Isotermal

Pada wilayah dengan kerapatan partikel yang lebih tinggi, fasa cair dan fasa padat yang umumnya terjadi pada suhu yang lebih rendah tentunya bentuknya akan berbeda.

C. MENDEFINISIKAN SUHU SECARA OPERASIONAL

Kita sudah terlibat banyak dengan menggunakan konsep yang dinamakan *suhu*, tetapi hingga saat ini belum diungkapkan apa jawaban kita kalau ada yang bertanya: apakah itu yang disebut suhu? Hal semacam ini sebenarnya bukan pertama kali kita hadapi dalam ilmu fisika. Konsep muatan listrik juga hal yang baru, tidak dapat dilihat seperti apa wujudnya, ataupun didengar suaranya, tetapi objek itu memang benar-benar ada, bahkan di jaman sekarang ini listrik merupakan keperluan hidup sehari-hari yang tidak lagi dapat kita tinggalkan. Baik, kalau soal nama ya kita sebut itu “listrik”. Tetapi itu belum cukup, kita perlu bentuk operasional misalnya cara mendeteksi ada atau tidaknya objek tersebut, sampai dengan membuat ukuran jumlah atau besarnya lewat resep pengamatan dan pengukuran.

Suhu kita bahas karena memang dapat dirasakan oleh pancaindra kita, jadi lebih riil dibandingkan dengan muatan listrik. Skala serta ukuran kuantitatifnya juga sudah kita buat berkaitan dengan air mendidih dan air membeku. Tetapi karena akan kita terapkan pada objek-objek alam lainnya maka memang diperlukan definisi operasionalnya.

Kesepakatan, yang tumbuh dari pengamatan menunjukkan bahwa jika dua benda atau lebih diperbolehkan untuk berinteraksi, misalnya diletakkan pada tempat yang sama atau didekatkan, maka ada sesuatu sifat yang tampaknya akan dimiliki bersama oleh kumpulan benda tersebut. Sifat yang sama-sama dimiliki oleh kumpulan benda tersebut yang akan kita sebut suhu. Kalau ada besi panas dimasukkan pada air yang dingin maka suatu saat ada sifat yang sama yang akan kita sebut suhu. Maksudnya, asal kita biarkan cukup lama maka baik air maupun besinya akan memiliki suhu yang sama. Begitu juga ruangan terbuka tempat hidup kita ini dikendalikan oleh suhu cuaca, sehingga benda-benda yang ada juga akan menyesuaikan suhunya dengan suhu lingkungan tersebut. Bisa saja suatu saat kita punya secangkir kopi panas, tetapi kalau kita biarkan cukup lama, maka lama-kelamaan suhunya turun hingga sama dengan suhu lingkungan.

Suhu lingkungan yang terbuka juga tidak mudah di rubah, kecuali kita masuk dalam ruangan dengan AC yang secara terus menerus mengonsumsi energi listrik untuk mengubah suhu ruangan tersebut. Kita tidak kuat untuk mengubah suhu lingkungan akibat cuaca sebab suhu tersebut dibentuk oleh kumpulan benda-benda alam yang jumlahnya sangat banyak. Diperlukan energi yang besarnya tak terbayangkan untuk mengubah suhu cuaca.

Jadi, rasanya tidak salah kalau kita mendefinisikan suhu secara operasional sebagai “sesuatu” sifat yang akan dimiliki bersama oleh kumpulan benda-benda asalkan sudah kita tunggu cukup lama benda-benda tersebut untuk saling berinteraksi.

Barangkali hal yang selalu harus kita ingat adalah bahwa suhu adalah *sifat kumpulan*. Sebuah besi yang panas punya suhu lebih tinggi daripada suhu lingkungan, tetapi besi itu *kumpulan* dari atom-atom yang membangunnya. Ketika kita belajar mekanika, misalnya tentang lintasan peluru, tidak pernah kita sebut lintasan peluru pada suhu berapa? Juga omong-omong hukum Coulomb itu berlaku pada suhu berapa, apa kalau suhunya lain hukum Coulombnya juga lain?

Nah, jadi kita baru melibatkan besaran suhu ketika kita membahas **kumpulan** benda-benda, termasuk benda-benda skala nanometer seperti kumpulan atom, molekul, elektron, ... dan sebagainya.



LATIHAN

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

- 1) Kalor adalah bentuk energi lain, mirip dengan energi listrik, energi mekanik, dan sebagainya. Karena itu kita dapat mengubah energi kalor menjadi energi mekanik atau energi listrik, sesuai dengan hukum kekekalan energi. Demikian pula sebaliknya, energi mekanik dapat diubah menjadi kalor, energi listrik juga dapat diubah menjadi kalor. Apa yang ada ketahui tentang hal tersebut?
- 2) Dalam termodinamika kita mengenal besaran yang disebut energi bebas. Jelaskan!

Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) Kalor memang salah satu wujud energi, seperti halnya dengan energi mekanik atau energi listrik. Tetapi kalor punya ciri yang khas: Kalau energi listrik atau energi mekanik dapat diubah seratus persen menjadi energi kalor, tidak begitu halnya dengan proses yang sebaliknya. Energi kalor tidak selamanya dapat di rubah seluruhnya menjadi energi mekanik atau energi listrik.
- 2) Sifat kalor, sebagai bentuk energi yang punya sifat khusus dibandingkan dengan energi mekanik atau energi listrik, membuat perlunya dibedakan antara kandungan energi kalor secara keseluruhan (disebut energi internal), dengan jumlah energi internal yang punya potensi untuk dapat diubah menjadi energi jenis lain seperti energi mekanik atau energi listrik. Porsi energi internal yang memiliki potensi untuk diubah menjadi energi jenis lain itulah yang disebut energi-bebas.



RANGKUMAN

1. Meskipun kita sering membahas konsep *suhu* kalau di nalar lebih serius, mungkin kita masih harus merumuskannya secara lebih operasional
2. Sama halnya dengan energi listrik, energi mekanik, energi magnetik, energi kimia, energi nuklir, ... dan seterusnya, kalor adalah energi yang terkait dengan gejala termal.
3. Ukuran kuantitatif untuk suhu dalam kaitan dengan kebiasaan sehari-hari di Indonesia diungkap dalam skala Celsius. Tetapi dari sisi teknis ada ukuran lain yang dinyatakan dengan derajat Kelvin. Skala tahapannya sama dengan skala Celsius, tetapi acuannya berbeda 273 derajat. Suhu 0°K merupakan batas suhu yang **secara alami** merupakan suhu paling rendah.
4. Objek alam dalam skala makro memiliki 4 tingkat wujud berurutan sesuai dengan rentangan suhunya. yang terendah wujud padat, kemudian wujud cair, lalu wujud gas, dan yang rentangannya tertinggi wujud plasma
5. Wujud gas paling banyak dibahas termodinamikanya karena ada sekurangnya tiga parameter, yaitu volume, tekanan, dan suhu. Kondisi suatu objek termodinamika diwakili oleh sebuah titik dalam ruang (tekanan, volume, suhu).
6. Ada istilah besaran intensif dan besaran ekstensif. Besaran ekstensif adalah besaran yang nilainya berbanding lurus dengan jumlah partikel dalam gas. Sedangkan besaran intensif nilainya tidak bergantung pada jumlah partikel dalam gas itu.
7. Tidak semua energi internal yang dimiliki kumpulan partikel dalam objek kita bisa diubah menjadi bentuk lain. Sebagian dari energi itu tidak dapat dimanfaatkan. Karenanya ada besaran yang dinamakan *energi bebas*, menunjuk besarnya energi maksimum yang dapat digunakan.
8. Sebuah proses termodinamika dari kondisi yang satu menjadi kondisi yang lain ada yang dipicu oleh usaha atau suplai kalor dari luar sistem. Ada proses yang dinamakan proses *quasi-statik* yang melibatkan usaha atau suplai kalor dari luar yang jumlahnya paling sedikit.
9. Untuk memudahkan abstraksi kita, lintasan lokasi titik dalam ruang (tekanan, volume, suhu) untuk sejumlah proses *quasi statik* lazimnya dilukiskan dalam bentuk grafik.



TES FORMATIF 1 _____

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Suhu sebuah objek dalam wujud padat, cair atau gas akan naik jika pada objek tersebut ditambahkan sejumlah kalor pernyataan itu
 - A. seluruhnya benar
 - B. hanya benar bila wujudnya padat
 - C. hanya benar jika wujudnya cair
 - D. hanya benar kalau wujudnya gas

- 2) Sebagai ukuran untuk suhu pada jaman ini ada beberapa pilihan yang lazim dipakai, misalnya: skala Celsius, skala Fahrenheit, skala Kelvin
 - A. pilihan skala yang dipakai adalah soal kebiasaan yang bisa berbeda dari satu negara/masyarakat dengan negara/masyarakat lainnya
 - B. pilihan skala Celsius lebih cocok untuk negara-negara dalam wilayah tropis
 - C. pilihan skala Kelvin lebih cocok untuk negara-negara dalam wilayah dingin
 - D. skala Kelvin dipakai karena dalam skala itu nilai terendahnya 0 tidak pernah dapat dicapai

- 3) Sebagai acuan ukuran suhu dalam skala Celsius, yang disebut suhu 0 derajat adalah suhu air yang mulai membeku menjadi es, sedangkan yang disebut suhu 100 derajat adalah suhu air ketika mendidih pada tekanan udara 1 atmosfer. Tetapi untuk keperluan praktis kita mengukur suhu badan tidak menggunakan air, melainkan termometer. Hal itu boleh dilakukan karena
 - A. kita memakai dasar kenyataan bahwa cairan air raksa memuai jika suhunya naik
 - B. kita memakai dasar hasil pengamatan bahwa hambatan listrik sepotong kawat tembaga akan naik jika suhu lingkungannya naik
 - C. termometer adalah alat pengukur suhu yang sudah dipakai di mana-mana
 - D. skala termometer telah ditera dengan menggunakan sifat air

- 4) Dalam termodinamika kita mengenal adanya besaran intensif dan besaran ekstensif
 - A. besaran intensif adalah besaran fisika yang dipelajari secara mendalam
 - B. besaran ekstensif adalah besaran fisika yang dipelajari secara meluas

- C. tekanan gas adalah contoh besaran intensif
 D. energi adalah contoh besaran ekstensif
- 5) Dalam mekanika kita mengenal hukum Newton, dalam kelistrikan kita mengenal hukum Faraday. Untuk suhu berapakah hukum-hukum itu berlaku?
 A. Hukum Newton hanya berlaku pada suhu yang tidak lebih dari 8000°K .
 B. Hukum Faraday berlaku untuk suhu berapa pun juga.
 C. Tidak ada kaitan antara hukum Faraday dengan suhu.
 D. Hukum Faraday tidak berlaku pada suhu kurang dari 4°K .
- 6) Wujud gas, kondisi sesaatnya dilukiskan oleh 3 buah parameter: volume V , tekanan P dan suhu T . Perpindahan dari satu keadaan ke keadaan yang lain merubah nilai parameter-parameter tersebut. Tentunya Anda pernah mendengar istilah **adiabatik**. Untuk sekedar mengingatkan
 A. adiabatik artinya perubahan yang mengubah dua parameter, kecuali suhu T
 B. adiabatik mengubah ketiga parameter V , P , dan T
 C. adiabatik artinya perubahan yang mengubah dua parameter, kecuali suhu V
 D. adiabatik artinya perubahan yang mengubah dua parameter, kecuali suhu P
- 7) Proses mengubah dari kondisi awal, misalnya (P_1, V_1, T_1) ke kondisi kedua (P_2, V_2, T_2) adakalanya melibatkan kerja (usaha) dari luar. Ada istilah “proses yang sifatnya quasi statik”. Maksudnya
 A. tidak merubah kondisi sama sekali (perubahan semu)
 B. tidak melibatkan kerja/usaha dari luar
 C. tidak menambahkan kalor dari luar
 D. prosesnya perlahan-lahan, langkahnya membuat perubahan kecil dan menunggu hingga keseimbangan tercapai, baru melanjutkan dengan langkah berikutnya

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

Entropi

A. ENTROPI

Pada termodinamika kita juga diperkenalkan dengan besaran yang disebut **entropi**. Pasti Anda sudah sering mendengar maupun menuliskan rumus-rumusnyanya. Tetapi apakah Anda sudah paham benar maknanya besaran itu?

1. Ukuran Entropi

Ditinjau dari persamaan [1-1], dimensi dari besaran entropi adalah [energi]/[suhu]. Ada juga besaran fisika yang dimensinya semacam itu, yaitu tetapan Boltzmann yang lambangnya k , sebab (kT) berdimensi energi. Jadi satuan entropi boleh dinyatakan dalam ukuran berapa besar dibandingkan dengan tetapan Boltzmann k .

2. Rumus untuk Menghitung Entropi

Pada pelajaran termodinamika biasanya dituliskan *rumus untuk menghitung* besarnya *perubahan* entropi dari kondisi A ke kondisi B sebagai berikut.

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{\delta Q}{T} \quad \text{lewat lintasan quasi statik} \quad [1-2]$$

Mungkin Anda sudah fasih menghitungnya, tetapi sebenarnya apa maknanya? Ada baiknya kita ulas di sini.

Lambang integral seperti ditulis pada rumus di atas sebenarnya adalah singkatan dari proses penjumlahan. Jadi

$$\int_A^B \frac{\delta Q}{T} = \frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} + \frac{\delta Q_3}{T_3} + \dots + \frac{\delta Q_N}{T_N} \quad [1-3]$$

Jadi, dari kondisi A, tentunya suhunya $T_1 = T_A$ dimasukkan dari luar sejumlah kalor δQ_1 . Tetapi jumlah pemasukan kalor itu δQ , seperti sudah kita bahas pada kegiatan belajar 1, bisa sembarangan. Kalau prosesnya dari kondisi A ke kondisi berikutnya yang hanya beda sedikit dari A itu kita lakukan proses yang *quasi-statik* maka nilai δQ -nya kita sebut δQ_1 . Setelah itu suhunya objek kita bisa saja berubah menjadi T_2 . Lalu kita menambahkan kalor lagi δQ , tidak dalam jumlah sembarangan melainkan lewat cara *quasi-statik*, tambahan kalor tadi kita sebut δQ_2 yang tidak harus sama dengan δQ_1 sebab sekarang suhunya bukan lagi $T_1 = T_A$, melainkan sudah berubah menjadi T_2 . Begitu seterusnya hingga akhirnya (misalnya setelah N tahapan) kita tiba pada kondisi B. Jumlah

$$\sum_{j=1}^N \frac{\delta Q_j}{T_j} = S_B - S_A \quad [1-4]$$

itulah yang kita sebut sebagai perubahan nilai entropi dari kondisi A ke kondisi B, yang lambang ungkapannya berbentuk integral persamaan [1-2].

Matematika integral semacam itu hitungannya tidak sama dengan kalau kita sekedar menghitung integral sebuah fungsi, ada lintasan proses yang harus dilalui dalam ruang dimensi-3 (tekanan, volume, suhu), yaitu lintasan *quasi-statik*. Oleh sebab itu integralnya sering disebut *integral-garis* (“line-integral”). Sudah kita bahas bahwa lintasan *quasi-statik* tersebut tidak selalu berupa garis lurus, jadi hati-hati kalau Anda nanti harus menghitung integral semacam itu. Sering kali pada lambang integralnya disisipkan huruf C (“curve”) untuk menunjukkan perbedaannya dengan integral fungsi biasa.

Pada termodinamika dijelaskan kalau yang dijumlahkan itu hanya $\delta Q_1 + \delta Q_2 + \dots + \delta Q_N$ meskipun sudah mengikuti lintasan *quasi-statik*, tetapi nilainya tidak akan berupa sebuah *fungsi termodinamika*, dalam arti nilainya dapat diletakkan pada ruang (tekanan, volume, suhu). Tetapi kalau yang

dihitung itu $\left[\left(\frac{\delta Q_1}{T_1} \right) + \left(\frac{\delta Q_2}{T_2} \right) + \dots + \left(\frac{\delta Q_N}{T_N} \right) \right]$ maka nilainya dapat dituliskan

sebagai perbedaan dua nilai sebuah fungsi termodinamika. lalu fungsi tersebut dinamakan entropi dan diberi lambang S. Definisi operasional semacam ini sangat berguna untuk melakukan hitungan, tetapi tidak cukup menjelaskan pertanyaan “mengapa demikian”. Baru setelah kita membahas

lebih mendalam kemudian kita dapat memberi makna yang lebih konkret. Itu akan lebih jelas kalau dibahas dengan menggunakan fisika statistik.

B. HUKUM DASAR TERMODINAMIKA

Sekarang kita akan mengulangi apa yang sering disebut hukum dasar dalam termodinamika. Sama halnya dengan mekanika, hukum tersebut sering diberi nomor. Jadi ada hukum Pertama, hukum Kedua, ... dan seterusnya.

1. Hukum Pertama

Hukum yang pertama, lazimnya ditulis dengan lambang sebagai berikut.

$$\delta Q = dU + \delta W \quad [1-5]$$

Ungkapan kalimatnya adalah: jika kita memasukkan kalor (sedikit) sebesar δQ , maka energi internal objek garapan kita akan naik sebesar dU ditambah banyaknya kerja yang dilakukan oleh objek kita itu, dilambangkan dengan δW . Dengan sengaja tambahan kalor itu tidak ditulis sebagai dQ , sebab dalam istilah kalkulus yang akan banyak kita pakai dQ disebut diferensial (eksak) dari sebuah fungsi yang namanya Q . Padahal tidak ada fungsi termodinamika yang kita sebut akumulasi kalor Q . Begitu juga halnya kerja atau usaha yang dilakukan oleh objek garapan kita tidak dapat dinyatakan sebagai fungsi termodinamika, jadi tidak boleh kita menuliskannya sebagai dW . Hukum pertama itu juga tidak boleh ditulis sebagai $Q = U + W$. Hukum pertama itu hanya menyebutkan hubungan antara besaran-besaran yang sangat kecil, dalam limit mendekati nol menurut istilah kalkulus.

Makna fisiknya tak lain daripada menyatakan bahwa kalor itu salah satu bentuk energi. Kalau ada kalor yang ditambahkan, maka jumlah energi yang dikandung dari tambahan kalor tersebut akan sama dengan tambahan energi internal dikurangi usaha (juga sebuah energi) yang mungkin saja dilakukan oleh objek garapan kita sebagai konsekuensi dari pemasukan energi kalor itu. Dengan perkataan lain hukum pertama termodinamika tak lain daripada hukum kekekalan energi, setelah kita menyatakan bahwa kalor adalah energi dalam bentuk lain, sebut saja energi termal.

2. Hukum Kedua

Hukum kedua termodinamika dapat ditulis dengan ungkapan matematika.

$$\delta Q = T \cdot dS \quad [1-6]$$

Maknanya dapat diungkap dengan menyatakan bahwa ada fungsi S yang disebut sebagai fungsi entropi yang perubahan kecilnya $dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)$. Artinya, hukum kedua boleh dikatakan sebagai pernyataan tentang adanya fungsi termodinamika yang disebut entropi yang nilainya diperoleh lewat proses seperti dilambangkan oleh persamaan [1-2].

Sebagai contoh, untuk membahas perangai gas, seperti kita pahami dari mekanika, kalau gas memuai dengan tambahan volume dV maka kerja yang dilakukan oleh gas tersebut adalah $\delta W = P \cdot dV$. Maka dengan menggabungkan hukum pertama dan hukum kedua kita memperoleh hubungan.

$$T \cdot dS = dU + P \cdot dV \quad [1-7]$$

Sekarang semuanya serba berbentuk diferensial, maka kita dapat menelaah konsekuensi-konsekuensinya dengan menggunakan aturan kalkulus.

3. Perluasan Wujud Hukum Pertama

Hukum Pertama yang intinya adalah hukum kekekalan energi, ungkapannya bisa diperluas. Persamaan [1-5] lebih enak kalau ditulis dalam bentuk.

$$dU = \delta Q - \delta W$$

yang dimaknai sebagai: penambahan energi internal terjadi karena ada tambahan energi kalor δQ tetapi harus dikurangi dengan kerja yang dilakukan oleh objek kita sebesar δW . Itu dengan anggapan bahwa kita tidak menambahkan partikel ke dalam objek garapan kita. Mereka yang berkecimpung dalam bidang kimia, harus menggarap gas dari campuran atom atau molekul yang bisa melakukan reaksi kimia, beberapa molekul diurai dan

musnah beberapa molekul jenis lain terbentuk. Untuk menampung hal-hal semacam ini, maka pada persamaan itu harus ditambahkan kenaikan energi internal hasil sumbangan dari penambahan atau pengurangan atom atau molekul pembangunnya. Untuk mudahnya kita membuat satuan energi yang harus ditambahkan kepada dU jika kita menambahkan **satu** atom atau molekul jenis- j . Besaran tersebut disebut *potensial kimia* dari atom / molekul yang dimaksud, lazimnya dilambangkan dengan μ_j . Jika dalam gas tersebut ada N_j tom atau molekul jenis- j , maka hukum pertama perlu dituliskan sebagai.

$$dU = \delta Q - \delta W + \sum_j \mu_j dN_j$$

Pada Pengantar Fisika Statistik ini sementara kita tidak membahas perluasan semacam itu, agar bahasan kita dapat dibatasi pada hal-hal yang sederhana dahulu.

C. HUBUNGAN KETERGANTUNGAN ANTARA FUNGSI-FUNGSI TERMODINAMIKA

1. Aturan Kalkulus

Untuk sekedar mengingatkan Anda, ada kalkulus dengan variabel yang lebih dari satu, misalnya variabelnya ada tiga dan kita sebut x , y dan z . Tentu saja yang kita maksudkan adalah bahwa x , y , dan z merupakan variabel-variabel yang *bebas* satu sama lain. Sebuah fungsi $f(x,y,z)$ dapat berubah sebesar df . Perubahannya itu disebabkan oleh berubahnya x sebesar dx , berubahnya y sebesar dy dan berubahnya z sebesar dz . Maka kita tuliskan

$$df = \alpha \cdot dx + \beta \cdot dy + \gamma \cdot dz \quad [1-8]$$

dengan

$$\alpha = \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial x} \quad [1-8a]$$

$$\beta = \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial y} \quad [1-8b]$$

$$\gamma = \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial z} \quad [1-8c]$$

Jadi nilai α , β , γ akan sangat bergantung pada bentuk fungsi f dalam kaitannya dengan variabel x , y dan z . Sekarang kita akan melihat konsekuensi-konsekuensi yang timbul dari hukum-hukum termodinamika itu.

2. Fungsi Energi Internal

Dari persamaan [1-7] kita boleh menuliskan

$$dU = T.dS + P . dV \quad [1-9]$$

Menurut kalkulus, itu berarti bahwa energi internal U itu merupakan fungsi dari entropi S dan volume V . Artinya, energi internal ditentukan oleh dua variabel, yaitu entropi S dan volume V , jadi $U = U(S,V)$. tetapi itu berakibat bahwa.

$$T = \frac{\partial U(S,V)}{\partial S} \text{ dengan menganggap } V \text{ konstan} \quad [1-10]$$

$$P = \frac{\partial U(S,V)}{\partial V} \text{ dengan menganggap } S \text{ konstan} \quad [1-11]$$

3. Fungsi Energi Bebas Helmholtz

Fungsi tersebut di definisikan sebagai $F = U - TS$. jadi kita boleh menuliskan diferensialnya

$$dF = dU - TdS - SdT \quad [1-12]$$

Tetapi menurut hukum Pertama dan Kedua $TdS = dU + PdV$ atau $(dU - TdS)$ kita ganti dengan $-PdV$, sehingga

$$dF = - SdT - PdV. \quad [1-13]$$

Maknanya F merupakan fungsi dari T dan V dan

$$S = - \frac{\partial F(T,V)}{\partial T} \text{ dengan menganggap } V \text{ konstan} \quad [1-14]$$

$$P = - \frac{\partial F(T,V)}{\partial V} \text{ dengan menganggap } T \text{ konstan} \quad [1-15]$$

Hasil ini mempunyai konsekuensi yang jauh, dari ungkapan persamaan [1-13] nilai dF akan = 0 jika $dT = 0$ dan $dV = 0$. Makna $dF = 0$ terjadi jika kurva $F(T,V)$ maksimum atau kurva $F(T,V)$ minimum. Kita ketahui dari prinsip fisika yang sangat umum, yaitu bahwa objek alam ini selalu ingin memilih kondisi agar nilai energinya sekecil mungkin.

Karena itu, maka kalau kurva $F(T,V)$ dilukis pada bidang (T,V) , maka kondisi yang akan dipilih oleh objek alam kita adalah kondisi yang membuat fungsi F minimum.

Fungsi energi bebas Helmholtz sering disebut fungsi energi bebas untuk T dan V yang tetap.

4. Fungsi Energi Bebas Gibbs

Ada lagi jenis fungsi energi bebas lain yang dikenal dengan nama energi bebas Gibbs. Nama Helmholtz dan nama Gibbs dicantumkan karena merekalah yang pertama kali menyajikan konsep besaran energi bebas. Jika kita mendefinisikan fungsi termodinamika

$$G = F + PV \quad [1-16]$$

maka kita dapat menuliskan

$$\begin{aligned} dG &= dF + PdV + VdP \\ &= -SdT - PdV + PdV + VdP \\ &= -SdT + VdP \end{aligned} \quad [1-17]$$

Artinya G merupakan fungsi dari T dan P , sedangkan

$$S = -\frac{\partial G(T,P)}{\partial T} \quad \text{dengan menganggap } P \text{ konstan} \quad [1-18]$$

$$V = \frac{\partial G(T,P)}{\partial P} \quad \text{dengan menganggap } T \text{ konstan} \quad [1-19]$$

Fungsi energi bebas Gibbs tentunya akan menjadi minimum pada T dan P yang membuat $dT = 0$ dan $dP = 0$. Kita boleh menyebut $G(T,P)$ sebagai *fungsi energi bebas pada suhu dan tekanan yang tetap*.

Masih banyak lagi hubungan ketergantungan antara fungsi-fungsi termodinamika yang dapat diturunkan lewat kalkulus berdasarkan pada dua hukum alam yang sudah disebutkan. Untuk tahap ini, kita batasi dahulu pada hal-hal yang terkait dengan pembahasan di modul-modul berikutnya.

D. ALAM PUNYA PILIHAN ARAH DALAM KAITAN DENGAN WAKTU

Termodinamika membahas perangai objek-objek alam dengan ukuran **makro**, seperti perangai gas, zat padat,...dan sebagainya. Objek-objek yang kita bahas dengan jelas dapat kita amati dengan pancaindra kita, dapat diukur dan dikumpulkan fakta-faktanya dengan cukup jelas. Perangai yang dimunculkannya kita catat dan kalau tampak ada aturan tertentu yang selalu diikuti, maka aturan tersebut kita nyatakan sebagai hukum-hukum alam.

Ada gejala-gejala yang menunjukkan bahwa alam ini punya pilihan arah kalau hal itu dikaitkan dengan waktu. Sebuah bola yang dilepas dari atas dan dipantul berulang-ulang oleh lantai, ternyata suatu saat akan berhenti. Hukum kekekalan energi mekanik itu ternyata tidak seratus persen benar. Ke mana larinya energi mekanik yang akhirnya habis itu? Kita dapat beralih mengatakan bahwa energinya tidak musnah begitu saja, hukum kekekalan energi tetap berlaku, energi mekanik itu diubah menjadi energi kalor ketika berpantulan dengan lantai berulang-ulang.

Tetapi anehnya setelah bola tersebut berhenti di lantai, lalu kita memanasi lantainya (artinya menyediakan energi kalor), mengapa bolanya tidak naik dan mulai melakukan proses pantul-memantul yang sebaliknya?

Bolehkah kita mengambil kesimpulan bahwa alam dapat mengubah energi mekanik menjadi energi kalor. Tetapi alam tidak bisa mengubah energi kalor menjadi energi mekanik?

Lho, tetapi dulu ada lokomotif kereta api yang dijalankan oleh uap air (panas), dan uap airnya dihasilkan dari pembakaran kayu atau batubara. Kereta apinya benar-benar dapat berjalan dengan kecepatan cukup tinggi dan dengan beban beberapa gerbong yang sanggup ditariknya. Bukankah itu contoh bahwa kita juga dapat mengubah energi kalor menjadi energi mekanik?

Betul, tetapi kita harus membuat mesin seperti lokomotif itu. Hanya dengan cara itu energi kalor dapat diubah menjadi energi mekanik.

Ah, tidak juga! Lihat itu balon udara yang bisa naik dengan menyalakan api pemanas pada bagian bawahnya!

Ya, tetapi kita harus membuat balon udaranya. Kalau objeknya bola yang terletak di lantai itu maka meskipun lantainya dipanasi tetap saja bolanya tidak dapat naik seperti balon udara.

Ya, itu diterangkan lewat hukum kedua termodinamika, energi kalor tidak seluruhnya dapat diubah menjadi bentuk energi lainnya seperti energi mekanik. Ada contoh siklus Carnot yang menunjukkan berapa banyak persentase energi kalor yang dapat diubah menjadi bentuk energi lainnya.

Tetapi ada contoh lain. Jika kita memiliki segelas air jernih. Lalu kita beri tetes tinta yang berwarna biru. Kalau didiamkan cukup lama, warna biru itu akan menyebar dan akhirnya mewarnai seluruh air yang di gelas tersebut. Sekarang kita bertanya bagaimana caranya agar kita dapat memperoleh kembali segelas air jernih dan tetes tinta biru? Pasti tidak dengan cara dibiarkan cukup lama proses itu akan berbalik kembali. Perlu upaya tertentu untuk dapat membalikkan prosesnya.

Contoh terakhir ini menunjukkan bahwa pilihan arah oleh alam itu bukan semata-mata hanya soal kalor. Ada alasan yang lebih mendasar lagi. Mudah-mudahan fisika statistik dapat menjelaskan hal ini.



LATIHAN

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

- 1) Dalam termodinamika ada fungsi-fungsi yang dikategorisasikan sebagai “potensial”, misalnya fungsi Energi Internal yang dilambangkan dengan huruf U . Besaran yang disebut Entropi, lambangnya S , juga dimasukkan dalam kategori ini. Jelaskan apa yang Anda ketahui tentang hal tersebut!
- 2) Sejumlah gejala alam menunjukkan bahwa proses alam yang sifatnya spontan tidak terjadi dalam arah waktu yang berlawanan. Beri contoh perwujudan sifat alam yang dimaksud tadi!

Petunjuk Jawaban Latihan

- 1) Kalau sebuah besaran termodinamika nilainya hanya bergantung pada nilai variabel P, V , dan T , hal itu berarti besaran tersebut nilainya tidak dipengaruhi oleh “sejarah proses” untuk sampai pada nilai tersebut. Jadi, (a) sebab hal tersebut melakukan kerja, atau menerima hasil kerja dari luar, sangat bergantung pada proses kerjanya itu, proses kerja yang berbeda bisa menghasilkan nilai (P, V, T) yang sama. (b) Jumlah keseluruhan kalor yang berusaha dimasukkan kepada objek kita

dipengaruhi oleh cara kita memasukkannya. Pernyataan (d) adalah soal kebiasaan/perjanjian dalam menuliskan lambang. Dalam aturan kalkulus menuliskan dK berarti perubahan diferensial fungsi potensial K .

- a. fungsi yang disebut potensial adalah fungsi yang nilainya hanya bergantung pada parameter (P, V, T) dan tentunya juga jumlah “partikel” N dan hasil kerja luar dalam bentuk energi (listrik, mekanik) yang dilambangkan dengan W tidak dapat disebut sebagai fungsi “potensial termodinamika”
 - b. hasil penambahan energi kalor sebesar Q tidak dapat disebut sebagai fungsi “potensial termodinamika”
 - c. tambahan energi kalor lazimnya dilambangkan dengan δQ , tidak boleh dilambangkan dengan dQ sebab Q bukan “potensial termodinamika”
- 2) Termodinamika sangat berbeda dengan pelajaran Mekanika atau Listrik yang rumus-rumusny bersifat “reversible”; pada termodinamika tampak aturan-aturan alam itu punya pilihan arah terhadap waktu, tentu saja jika tidak ada intervensi dari kita. Contoh (a) dan contoh lainnya adalah (b) hal tersebut melukiskan pilihan arah gejala alam yang spontan.
- a. air jernih dalam gelas, kalau diberi setetes tinta biru tanpa diapa-apakan warnanya akan menyebar ke seluruh air jernih tadi. Tetapi kejadian yang sebaliknya tidak akan terjadi tanpa upaya yang cukup sukar;
 - b. salah satu bentuk alat penangkap ikan berupa sebuah ruangan tertutup yang transparan berisi makanan ikan. Ada pintunya sehingga ikan yang tertarik bisa masuk ruangan tersebut tetapi tidak bisa keluar.



RANGKUMAN

1. Ada fungsi termodinamika yang dinamakan entropi, dimensi satuannya adalah dimensi energi dibagi dimensi suhu, sama dengan dimensinya tetapan Boltzmann.
2. Ada resep matematika untuk menghitung besarnya perubahan entropi dari kondisi termodinamika A ke kondisi B . Hitungannya berbentuk *integral-garis* dalam ruang dimensi-3 (P, V, T), dengan kurva lintasan yang melukiskan proses *quasi-statik*.
3. Hukum termodinamika pertama pada dasarnya adalah hukum kekekalan energi, tetapi dengan mengakui bahwa kalor adalah salah

satu bentuk energi. Dalam ukuran kecil penambahan energi internal diperoleh dari pemberian kalor dari luar dikurangi dengan kerja yang dilakukan oleh objek garapan kita dalam proses ini.

4. Untuk objek yang dapat menambah jumlah partikelnya, ada tambahan energi khusus lewat satuan potensial kimia partikel yang ditambahkan.
5. Paduan antara hukum pertama dan hukum kedua termodinamika memungkinkan ungkapan yang seluruhnya berbentuk diferensial dalam istilah bahasa simbolik kalkulus. Dengan demikian konsekuensi-konsekuensinya dapat diturunkan semata-mata dari hitungan kalkulus.
6. Dari kesimpulan konsekuensi kalkulus, energi bebas Helmholtz merupakan energi bebas yang akan dipilih oleh objek garapan kita, pada suhu dan volume yang konstan.
7. Dapat juga disusun fungsi energi bebas Gibbs, yang merupakan energi bebas yang akan dipilih oleh objek garapan kita, pada suhu dan tekanan yang konstan
8. Gejala-gejala alam menunjukkan adanya pilihan arah dalam kaitan dengan waktu. Alam dengan spontan dapat mengubah energi yang bukan kalor, seperti energi mekanik menjadi energi kalor. Tetapi alam tidak akan melakukan proses sebaliknya secara spontan.
9. Pilihan arah dalam kaitan dengan waktu oleh alam bukan semata-mata tentang energi kalor, tetapi ada akar yang lebih mendasar, yang diharapkan dapat dijernihkan oleh fisika statistik.



TES FORMATIF 2

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Hukum Pertama Termodinamika pada dasarnya adalah Hukum Kekekalan Energi, tetapi dengan memasukkan kalor sebagai bentuk lain dari energi, sama halnya dengan energi listrik atau energi mekanik. Bagaimana pendapat Anda atas 4 pernyataan di bawah ini ...
 - A. kalau pada gas ideal U adalah energi internalnya, W adalah kerja/usaha yang dilakukan oleh gas ideal tersebut, dan Q adalah kalor yang ditambahkan dari luar, maka berlaku hubungan $U = W + Q$
 - B. kalau pada gas ideal U adalah energi internalnya, W adalah kerja/usaha yang dilakukan oleh gas ideal tersebut, dan Q adalah kalor yang ditambahkan dari luar, maka berlaku hubungan $U = Q - W$

- C. kalau pada gas ideal U adalah energi internalnya, W adalah kerja/usaha yang dilakukan oleh gas ideal tersebut, dan Q adalah kalor yang ditambahkan dari luar, maka berlaku hubungan $dU = \delta Q - \delta W$
- D. Kalau pada gas ideal U adalah energi internalnya, W adalah kerja/usaha yang dilakukan oleh gas ideal tersebut, dan Q adalah kalor yang ditambahkan dari luar, maka berlaku hubungan $dU = \delta Q - dW$
- 2) Hukum kedua termodinamika sering diungkapkan dalam bentuk lambang $\delta Q = T.dS$, maknanya
- A. ada fungsi termodinamika dengan lambang S yang kalau dikalikan dengan suhu absolut T nilainya sama dengan jumlah kalor yang ditambahkan kepada objek kita
- B. kalau kita menambahkan kalor dalam jumlah yang sangat kecil pada suhu T , itu akan menaikkan fungsi entropi S dalam jumlah yang sangat kecil juga, tetapi nilai tambahan entropinya sama dengan jumlah kecil kalor itu dibagi dengan suhu T saat proses tersebut dilakukan
- C. tambahan nilai fungsi potensial entropi diperoleh dengan melakukan Integral Garis besaran $\left(\frac{\delta Q}{T}\right)$ dalam ruang (P,V,T) dari kondisi awal ke kondisi akhirnya
- D. hukum kedua termodinamika sekedar menunjukkan adanya fungsi Potensial Termodinamika yang kita sebut entropi (lambang S)
- 3) Gabungan antara hukum pertama dan hukum kedua termodinamika untuk kasus gas sering dituliskan dalam bentuk: $dU = T.dS - P.dV$. Alasannya
- A. untuk kasus gas, jika gas menambah volumenya dengan dV maka kerja yang dilakukannya ekuivalen dengan energi sebesar $P.dV$
- B. dalam persamaan tersebut kita hanya melibatkan besaran-besaran yang dapat dikategorisasikan sebagai potensial termodinamika, dan besaran intensif
- C. dari persamaan tersebut kita dapat melakukan penalaran dengan menggunakan matematika kalkulus
- D. persamaan tersebut belum sempurna karena belum melibatkan apa yang terjadi jika jumlah partikelnya berubah seperti hal yang lazim berlangsung dalam proses kimia

- 4) Fungsi energi bebas Helmholtz didefinisikan sebagai $F = U - T.S$. Maknanya
- banyaknya energi yang bisa digunakan secara bebas bukan energi internal U , ada sebagian energi yaitu $T.S$ yang tidak bisa diubah dari energi kalor menjadi energi listrik ataupun energi mekanik
 - definisi F semacam itu hanya dimaksudkan agar kita punya fungsi potensial termodinamika yang lain
 - pada kasus gas, F melukiskan besarnya energi termal yang bisa diubah menjadi energi mekanik atau energi listrik hanya jika prosesnya berlangsung pada tekanan yang tetap
 - pada kasus gas, F melukiskan besarnya energi termal yang bisa diubah menjadi energi mekanik atau energi listrik hanya jika prosesnya berlangsung pada volume yang tetap
- 5) Dari cara mendefinisikan fungsi energi bebas Helmholtz dapat disimpulkan bahwa
- semakin tinggi suhunya semakin banyak energi kalor yang tidak dapat diubah menjadi energi mekanik atau energi listrik
 - semakin tinggi nilai entropinya semakin banyak energi kalor yang tidak dapat diubah menjadi energi mekanik atau energi listrik
 - entropi adalah besaran yang mengganggu kemudahan kita dapat mengubah energi kalor menjadi energi mekanik atau energi listrik
 - pada suhu $T = 0^\circ\text{K}$ semua energi kalor dapat diubah menjadi energi listrik atau energi mekanik

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) Hubungan antara pemberian kalor dengan kenaikan suhu, tidak selamanya linier. Kita kenal ada suhu yang terkait dengan proses perubahan dari wujud cair ke wujud gas atau dari wujud padat ke wujud cair. Saat itu, meskipun kita tambahkan kalor tidak terjadi kenaikan suhu, karena kalor yang ditambahkan digunakan untuk proses mengubah wujud (fase). Jadi jawaban (a) kurang tepat, jawaban (b) tentunya benar selama suhunya bukan suhu transisi ke wujud cair; jawaban (c) juga benar asalkan suhunya tidak pada suhu transisi ke padat ataupun ke gas; jawaban (d) tentunya juga benar.
- 2) Penggunaan skala suhu Celsius ataupun Fahrenheit lebih dikaitkan dengan kebiasaan dalam masyarakat atau negara tertentu, karena lebih berupa alat komunikasi untuk kehidupan praktis. Penggunaan skala Kelvin lebih terkait dengan kebiasaan keilmuan, sebab suhu 0°K benar-benar suhu yang tak pernah dapat diwujudkan (kecuali sekedar didekati sedekat mungkin) secara alami. Jadi jawaban (a) tidak tepat untuk kasus skala Kelvin; jawaban (b) dan (c) tidak benar sebab beberapa negara dengan musim dingin juga ada yang menggunakan skala Celsius.; jawaban (d) tentunya yang benar.
- 3) Definisi kuantitatif suatu besaran tidak selamanya diwujudkan dalam praktek kebiasaan sehari-hari. Ketika kita membaca skala termometer air-raksa, yang sesungguhnya diukur adalah besarnya pemuai air-raksa tersebut. Tetapi secara tidak langsung juga dapat dikaitkan dengan definisi suhu yang ungkapannya terkait dengan suhu air pada tekanan 1 atmosfer. Begitu juga halnya dengan yang kita baca dari termometer digital. Yang penting masing-masing alat sudah ditera sesuai dengan standar definisi skala suhu. Jadi, jawaban (a) dan (b) benar, sebab menunjukkan dasar kalibrasi yang digunakan; jawaban (c) lebih merupakan kepercayaan masyarakat; jawaban (d) tentunya benar kalau ditambah dengan (a) dan (b).
- 4) Istilah intensif dan ekstensif memang memiliki banyak makna, tetapi yang digunakan pada termodinamika dimaksudkan untuk membedakan antara besaran fisika yang terkait dengan kumpulan dari banyak atom atau molekul. Ada besaran yang nilainya bergantung pada jumlah atom

atau molekul yang sedang kita bahas, tetapi ada juga besaran fisika yang nilainya tidak bergantung pada jumlah atom atau molekul yang kita garap. Jadi, jawaban (a) dan (b) salah; jawaban (c) dan (d) benar.

- 5) Perlu disadari bahwa kita membahas besaran suhu hanya kalau objek yang kita bahas adalah agregat yang terdiri atas banyak atom atau molekul. Hukum Newton membahas aturan tentang gerak objek yang (meskipun terdiri atas kumpulan banyak atom atau molekul) sudah disederhanakan dalam bentuk tunggal seperti bumi, balok, silinder,..dsb. dengan. Parameter yang digunakan adalah massanya, geometri bentuknya, dan sebagainya. Dengan demikian pada waktu kita membahas hukum Newton kita tidak menyebut-nyebut soal suhunya. Begitu pula halnya dengan hukum Faraday tentang kelistrikan. Kita membahas suhu ketika kita menggarap sifat kelistrikan seperti bahan logam, semikonduktor, dan sebagainya. Jadi, yang bisa dianggap sebagai jawaban yang mendekati kebenaran adalah jawaban (c), jawaban (a), (b), (d) bukan jawaban yang tepat.
- 6) Proses adiabatik adalah proses yang tidak melibatkan tambahan sesuatu dari luar, misalnya gas yang berada dalam lingkungan tertutup yang sempurna tidak akan terpengaruh oleh suhu lingkungan. Jadi, jawaban (a) tidak benar, begitu pula dengan jawaban (c) dan (d); sedangkan jawaban (b) prinsipnya benar tetapi masih kurang lengkap.
- 7) Tentu saja kalau diinginkan terjadinya perubahan dari kondisi (P_1, V_1, T_1) ke kondisi baru yang kita kehendaki, misalnya (P_2, V_2, T_2) , asalkan tetap memenuhi aturan (untuk gas ideal $PV = NkT$) umumnya hal itu dapat dilakukan. Hanya caranya bisa berbeda-beda. Proses “quasi statik” adalah proses yang dilakukan secara perlahan-lahan, setiap kali selalu menunggu kondisinya stabil, sehingga usaha luar yang kita lakukan sekecil mungkin. Jadi, jawaban (a), (b) dan (c) tidak tepat. Yang tepat adalah jawaban (d).

Tes Formatif 2

- 1) Sesuai dengan pemahaman kita akan makna dari fungsi potensial termodinamika, maka pernyataan (a) tidak benar, begitu pula dengan pernyataan (b), dan (d). Hanya pernyataan (c) yang benar, bisa digunakan.
- 2) Jawaban (a) jelas tidak benar karena tidak mencerminkan arti dari $\delta Q = TdS$. Jawaban (b) benar merupakan makna dari ungkapan simbolik

di atas. Jawaban (c) benar, asalkan dalam bahasa simbolik kalkulus kita melakukan integralnya menggunakan “integral garis” yaitu lingkungan dalam ruang tiga dimensi yang melukiskan proses *quasi statik*.

- 3) Jawaban (a) benar karena untuk kasus gas, kerja yang dilakukan oleh gas itu hanyalah mengembangkan atau mengecilkan volumenya. Jawaban (b) juga benar sebab T besaran intensif, U , S , besaran potensial termodinamika, sedangkan V salah satu variabel dalam ruang (P, V, T) . Jawaban (c) juga benar sebab dalam persamaan tersebut hanya terlibat variabel (P, V, T) dan fungsi potensial termodinamika.
- 4) Pernyataan (a) benar sebab merupakan ungkapan kalimat sebagai perwujudan dari rumus simbolik matematik yang ada. Jawaban (b) tidak benar, sebab ada alasan yang kuat untuk memaknai secara operasional apa yang disebut energi bebas. Pernyataan (d) hampir benar karena kita dapat menjabarkan dengan kalkulus bahwa $dF = -S.dT - P.dV$. yang bermakna dF akan menjadi paling kecil jika baik dT maupun dV nilainya sama dengan nol, artinya $F(V, T)$ minimum. Pernyataan (c) jelas salah.
- 5) Dari definisi fungsi energi bebas Helmholtz, kesimpulan (a) jelas benar, begitu juga halnya dengan pernyataan (b). Kesimpulan (c) merupakan terjemahan lain dari kesimpulan (b), jadi juga benar. Dibaca dari rumus matematikanya kesimpulan (d) benar, sayangnya situasi dengan $T = 0^\circ\text{K}$ tidak pernah akan dapat dicapai.

Daftar Pustaka

Pointon, A.J. (1976). *Introduction to Statistical Physics*. Longman-Green.

Huang, Kerson. (2001). *Introduction to Statistical Physics*. Taylor & Francis.