



REPUBLIK INDONESIA  
KEMENTERIAN HUKUM DAN HAK ASASI MANUSIA

# SURAT PENCATATAN CIPTAAN

Dalam rangka perlindungan ciptaan di bidang ilmu pengetahuan, seni dan sastra berdasarkan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta, dengan ini menerangkan:

Nomor dan tanggal permohonan : EC00202111180, 14 Februari 2021

## Pencipta

Nama : **Muhammad Arifuddin dan Andi Ichsan Mahardika**  
Alamat : Jl. Sultan Adam Kompleks Mandiri Permai No. 65, Banjarmasin,  
KALIMANTAN SELATAN, 70122  
Kewarganegaraan : Indonesia

## Pemegang Hak Cipta

Nama : **Muhammad Arifuddin dan Andi Ichsan Mahardika**  
Alamat : Jl. Sultan Adam, Komplek Mandiri Permai No. 65, Banjarmasin,  
KALIMANTAN SELATAN, 70122  
Kewarganegaraan : Indonesia

Jenis Ciptaan : **Buku Pelajaran**

Judul Ciptaan : **Termodinamika**

Tanggal dan tempat diumumkan untuk pertama kali : 1 Agustus 2018, di Banjarmasin  
di wilayah Indonesia atau di luar wilayah Indonesia

Jangka waktu perlindungan : Berlaku selama hidup Pencipta dan terus berlangsung selama 70 (tujuh puluh) tahun setelah Pencipta meninggal dunia, terhitung mulai tanggal 1 Januari tahun berikutnya.

Nomor pencatatan : 000238217

adalah benar berdasarkan keterangan yang diberikan oleh Pemohon.

Surat Pencatatan Hak Cipta atau produk Hak terkait ini sesuai dengan Pasal 72 Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta.

a.n. MENTERI HUKUM DAN HAK ASASI MANUSIA  
DIREKTUR JENDERAL KEKAYAAN INTELEKTUAL



Dr. Freddy Harris, S.H., LL.M., ACCS.  
NIP. 196611181994031001

## Disclaimer:

Dalam hal pemohon memberikan keterangan tidak sesuai dengan surat pernyataan, menteri berwenang untuk mencabut surat pencatatan permohonan.

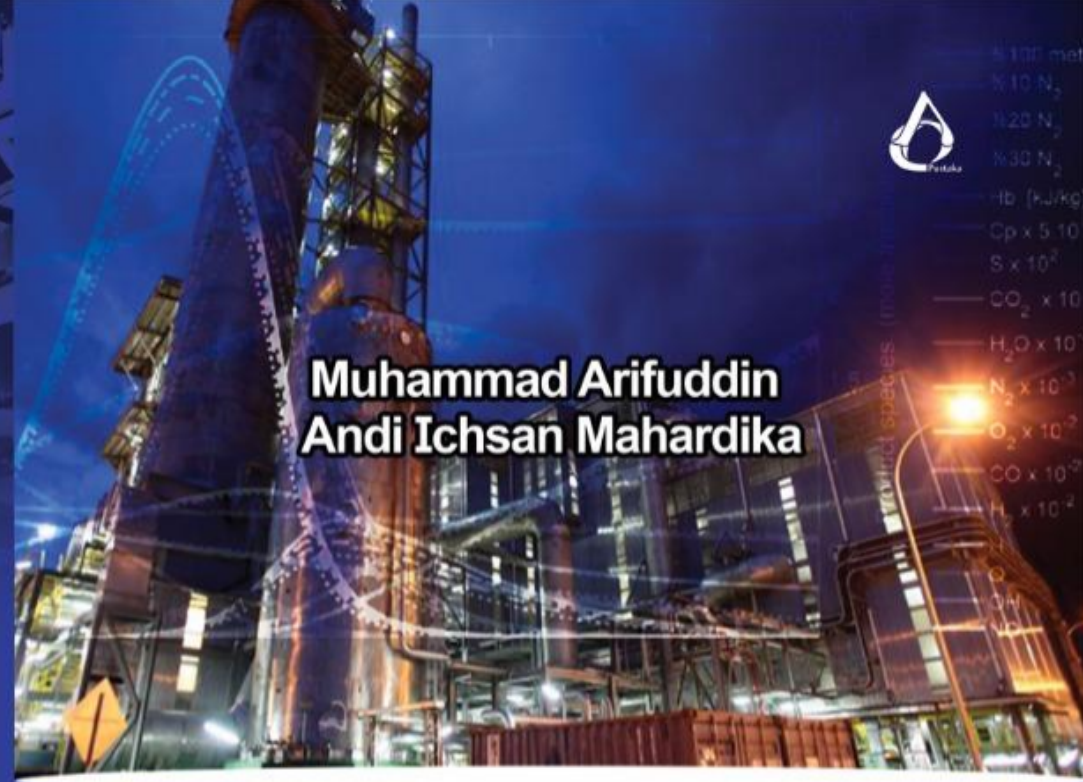
# BUKU AJAR TERMODINAMIKA

Muhammad Arifuddin  
Andi Ichsan Mahardika

TERMODINAMIKA

Termodinamika mengkaji hubungan antara energi dan usaha dari suatu sistem, serta sifat-sifat yang mendukungnya. Kajian termodinamika dapat dipelajari dengan tiga pendekatan, yaitu: mikroskopik, statistik, dan makroskopik. Pendekatan mikroskopik meninjau kelakuan dan keadaan tiap partikel atau molekul. Pendekatan secara statistik didasarkan pada statistika dan teori peluang. Pendekatan secara makroskopik yang ditinjau adalah efek rata-ratanya dari semua molekul, efek ini dapat dirasakan oleh indera kita dan dapat diukur oleh alat ukur.

Buku ini mencakup pembahasan Sistem Termodinamika, Teori Kinetik Gas, Persamaan Keadaan, Turunan Parsial dalam Termodinamika, Hukum Pertama Termodinamika, Penerapan Hukum Pertama Termodinamika, Hukum Kedua Termodinamika, serta Perpaduan Hukum I dan II Termodinamika.



Muhammad Arifuddin  
Andi Ichsan Mahardika

# BUKU AJAR TERMODINAMIKA



PENERBIT  
NAS MEDIA PUSTAKA  
Anggota IKAPI

Jl. Balau Raya No. 550 Makassar, Sulawesi Selatan 90253  
Phone : +62811-43222-71 / +62853-6363-9252  
E-mail : [nasmedia@nasmediapustaka.com](mailto:nasmedia@nasmediapustaka.com)  
Website : [www.nasmediapustaka.co.id/](http://www.nasmediapustaka.co.id/) [www.nasmediabooks.com](http://www.nasmediabooks.com)

Facebook: [nasmediapustakapenerbit](https://www.facebook.com/nasmediapustakapenerbit) Instagram: [@nasmediapustakapenerbit](https://www.instagram.com/nasmediapustakapenerbit)

EDUKASI

ISBN 978-602-66248-5



9 786025 662485

BUKU AJAR



Universitas Lambung Mangkurat

## PRAKATA

Alahamdulillahirabbil'alamin, segala puji hanya milik Allah Azza wa jalla, Rabb semesta alam. Penyusun panjatkan kehadiran-Nya yang telah memberikan limpahan rahmat, karunia dan kekuatan sehingga buku "*Termodinamika*" ini dapat selesai. Salam dan salawat senantiasa dihaturkan kepada Rasulullah Muhammad Sallallahu 'Alahi Wassallam, juga kepada keluarga beliau, para sahabatnya, dan orang-orang mukmin yang senantiasa istiqomah meniti hidup dengan Islam.

Kebutuhan akan buku-buku sains berbahasa Indonesia bagi kalangan mahasiswa dirasakan masih kurang. Menyikapi kondisi tersebut, buku ini disusun untuk menjadi referensi tambahan untuk kajian termodinamika. Buku ini mencakup pembahasan Sistem Termodinamika, Teori Kinetik Gas, Persamaan Keadaan, Turunan Parsial dalam Termodinamika, Hukum Pertama Termodinamika, Penerapan Hukum Pertama Termodinamika, Hukum Kedua Termodinamika, serta Perpaduan Hukum I dan II Termodinamika. Pada setiap akhir pembahasan suatu bab diberikan contoh soal, soal latihan dan tugas. Dalam contoh soal, soal latihan dan tugas, proses penyelesaian menggunakan tahapan penyelesaian masalah, diharapkan dengan menggunakan tahapan tersebut dapat lebih melatih siswa singgah dapat meningkatkan keterampilan penyelesaian masalah dan pemahaman konsep mahasiswa.

Penyusun menyadari sedalam-dalamnya bahwa buku ini, terwujud berkat berbagai pihak yang memberikan dukungan dan bantuan bagi penulis. Oleh karena itu, dihaturkan terima kasih yang tak berhingga sehingga buku ini diterbitkan. Penyusun menyadari bahwa buku referensi ini masih sangat jauh dari sempurna, oleh karena itu saran dan kritik yang konstruktif sangat diharapkan demi perbaikan buku ini di masa mendatang. Mudah-mudahan buku yang sederhana ini dapat memberikan manfaat bagi pemerhati pendidikan fisika.

Banjarmasin, Agustus 2018

Tim Penyusun



# DAFTAR ISI

<b>PRAKATA</b>	iii
<b>DAFTAR ISI</b>	v
<b>BAB I SISTEM TERMODINAMIKA</b>	1
A. Pendahuluan	1
B. Sistem Termodinamika	2
C. Keseimbangan Termodinamika	2
D. Proses	3
E. Variabel Intensif dan Ekstensif	4
F. Tekanan	5
G. Hukum ke Nol Termodinamika	6
H. Contoh Soal	14
I. Soal Latihan	20
J. Tugas	23
<b>BAB II TEORI KINETIK GAS</b>	29
A. Teori Kinetik Gas	29
B. Gas Ideal (Gas Sempurna)	30
C. Hukum Ekuipartisi	37
D. Kapasitas Kalor Jenis	38
E. Kelajuan Molekul	39
F. Jalan Bebas Rata-rata Molekul	42
G. Gas Nyata	45
H. Contoh Soal	46
I. Soal Latihan	52
J. Tugas	59
<b>BAB III PERSAMAAN KEADAAN</b>	65
A. Persamaan Keadaan	65
B. Persamaan Keadaan Gas Sempurna	66
C. Persamaan Keadaan Gas Nyata	66
D. Bidang $p$ - $v$ - $T$ Gas Sempurna	68
E. Bidang $p$ - $v$ - $T$ Gas Nyata	69
F. Persamaan Keadaan Sistem Lain	75
G. Tetapan Gas Van der Waals	76
H. Diagram $p$ $v$ - $p$ Gas Van der Waals, Suhu Boyle	78
I. Hukum Keadaan Bersesuaian ( <i>The Law of Corresponding States</i> )	81
J. Diagram $\pi\phi$ - $\pi$ Van der Waals, Suhu Boyle Tereduksi	82

K. Contoh Soal	84
L. Soal Latihan	90
M. Tugas	97
<b>BAB IV TURUNAN PARSIAL DALAM TERMODINAMIKA</b>	<b>103</b>
A. Turunan Parsial	104
B. Turunan Parsial dalam Termodinamika	110
C. Contoh Soal	125
D. Soal Latihan	131
E. Tugas	138
<b>BAB V HUKUM PERTAMA TERMODINAMIKA</b>	<b>143</b>
A. Usaha Termodinamik	143
B. Usaha pada Perubahan Volume	145
C. Bentuk Lain Usaha	147
D. Usaha Konfigurasi dan Disipatif	149
E. Energi Dalam dan Energi Total	150
F. Aliran Kalor	152
G. Hukum Pertama Termodinamika	152
H. Kapasitas Kalor dan Kapasitas Kalor Jenis	154
I. Kalor Transformasi dan Entalpi	156
J. Kalor Jenis Volume Tetap dan Kalor Jenis Tekanan Tetap	159
K. Energi Dalam, Entalpi dan Kalor Jenis Gas Sempurna	160
L. Kekekalan Massa	162
M. Persamaan Energi untuk Aliran Tunak	163
N. Contoh Soal	167
O. Soal Latihan	172
P. Tugas	179
<b>BAB VI PENERAPAN HUKUM PERTAMA TERMODINAMIKA</b>	<b>185</b>
A. Persamaan Fungsi Energi $T-v$ , $T-p$ dan $p-v$	185
B. Energi Dalam Gas	191
C. Selisih Kalor Jenis	193
D. Proses Adiabatik	194
E. Mesin Kalor dan Mesin Pendingin (Refrigerator)	196
F. Mesin Stirling dan Mesin Carnot	200
G. Skala Suhu Mutlak	206
H. Contoh Soal	208
I. Soal Latihan	214
J. Tugas	221
<b>BAB VII HUKUM KEDUA TERMODINAMIKA</b>	<b>227</b>
A. Hukum Kedua Termodinamika	227

B. Proses Reversibel dan Ireversibel	229
C. Entropi	230
D. Pernyataan Clausius dan Kelvin-Planck Tentang Hukum Kedua Termodinamika	237
E. Bukti Kesetaraan Pernyataan Kelvin-Planck dan Pernyataan Clausius	240
F. Contoh Soal	242
G. Soal Latihan	248
H. Tugas	257
<b>BAB VIII PERPADUAN HUKUM I DAN II TERMODINAMIKA</b>	<b>263</b>
A. Hukum I Termodinamika	263
B. Hukum II Termodinamika	264
C. Perpaduan Hukum I Dan II Termodinamika	264
D. Contoh Soal	286
E. Soal Latihan	292
F. Tugas	299
<b>DAFTAR PUTAKA</b>	<b>305</b>





### A. Pendahuluan

Termodinamika merupakan bagian dari cabang Fisika yakni Termofisika (*Thermal Physics*). Termodinamika adalah ilmu yang mempelajari hubungan antara energi dan usaha dari suatu sistem, serta sifat-sifat yang mendukung tersebut. Dapat pula dikatakan bahwa termodinamika mempelajari energi dan transformasinya. Termodinamika juga dapat diartikan sebagai ilmu yang menjelaskan kaitan antara besaran fisis tertentu yang menggambarkan sikap zat di bawah pengaruh kalor. Besaran fisis ini disebut koordinat makroskopis sistem. Kaitan atau rumus yang menjelaskan hubungan antar besaran fisis diperoleh dari eksperimen dan kemudian dapat digunakan untuk meramalkan perilaku zat di bawah pengaruh kalor.

Suatu sistem dapat dipelajari dengan tiga pendekatan, yaitu: mikroskopik, statistik, dan makroskopik. Pada pendekatan secara mikroskopik, untuk menentukan kedudukan satu molekul gas misalnya, diperlukan 3 koordinat; demikian pula untuk kecepatannya. Jadi untuk  $N$  molekul diperlukan  $6N$  persamaan agar dapat melukiskan kelakuan molekul-molekul gas tersebut, hal ini jelas amat sukar.

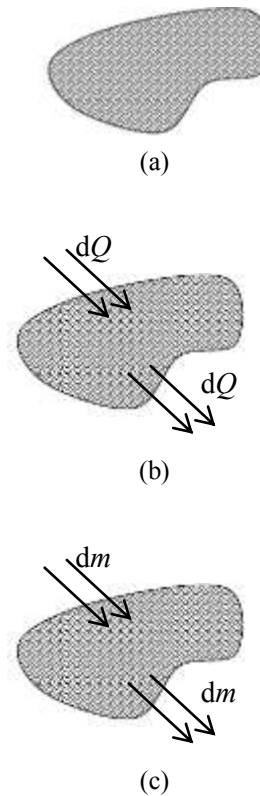
Pendekatan secara statistik didasarkan pada statistika dan teori peluang (*probability theory*). Dalam hal ini yang dicari adalah nilai rata-rata untuk semua partikel yang dipelajari, misalnya kecepatan rata-ratanya. Pendekatan ini digunakan pada Teori Kinetik dan Mekanika Statistik atau Termodinamika Statistik.

Pada pendekatan secara makroskopik yang ditinjau adalah efek rata-ratanya dari semua molekul. Efek ini dapat dirasakan oleh indera kita dan dapat diukur oleh alat ukur. Sebagai contoh ialah tekanan, suhu, dan lain-lain. Pendekatan ini digunakan dalam termodinamika klasik. Termodinamika klasik, termodinamika statistik, dan teori kinetik adalah saling melengkapi, yang satu melengkapi yang lain.

## B. Sistem Termodinamik

Sistem adalah sejumlah zat yang dibatasi oleh dinding tertutup. Zat yang dimaksud di sini dapat berupa objek atau partikel tunggal, kelompok objek atau partikel, zat padat, cair, atau gas, dapat pula dipol magnet, energi radiasi, foton, dan lain-lain. Dinding yang membatasi sistem itu boleh nyata, boleh khayal, bersama dengan sistem yang dibatasinya, tidak perlu mempunyai bentuk dan volume yang tetap.

Lingkungan dari suatu sistem adalah semua sistem lain yang dapat saling bertukar energi dengan sistem tersebut. Suatu sistem bersama dengan lingkungannya disebut semesta (*universal*). Suatu sistem disebut terisolasi bila tak terjadi pertukaran energi (kalor dan usaha) dengan lingkungannya. Suatu sistem disebut tertutup bila tak ada zat yang menembus dinding batasnya keluar atau masuk ke dalam sistem tersebut namun memungkinkan pertukaran energi. Suatu sistem dikatakan terbuka jika terjadi pertukaran energi (panas dan kerja) dan zat dengan lingkungannya.



**Gambar 1.1.** (a) Sistem terisolasi, (b) Sistem tertutup, (c) sistem terbuka

## C. Keseimbangan Termodinamik

Pada umumnya suatu sistem berada dalam keadaan sembarang (*arbitrary state*). Ini berarti bahwa dalam sistem tersebut, terdapat perbedaan suhu antara bagian-bagiannya, variasi tekanan, dan reaksi kimia. Apabila sistem itu ditunggu beberapa saat dapatlah terjadi keseimbangan-keseimbangan berikut.

Sistem dalam keseimbangan termal jika perbedaan suhu hilang. Sistem dalam keseimbangan mekanik jika variasi tekanan hilang. Sistem dalam keadaan

keseimbangan kimia jika tak terjadi lagi reaksi kimia. Jika ketiga macam keseimbangan itu telah dicapai, maka dikatakan bahwa sistem dalam keseimbangan termodinamik.

Selain keseimbangan termodinamik seperti yang telah diuraikan di atas, masih ada jenis keseimbangan yang lain, seperti yang akan diuraikan di bawah ini.

### 1. Keseimbangan stabil (mantap)

Pada sistem mekanis misalnya bola yang terletak pada permukaan cekung. Dalam sistem fluida, misalnya gas di dalam sebuah silinder pada suhu konstan. Keduanya akan kembali ke keadaan semula bila diberi simpangan (perubahan) dan kemudian dibebaskan.

### 2. Keseimbangan netral

Sebuah bola yang diletakkan pada bidang horizontal, bila diberi simpangan ke kedudukan sembarang pada bidang tersebut, akan tetap menempati kedudukan baru ini walaupun dibebaskan. Suatu sistem yang terdiri atas cairan dan uapnya pada suhu konstan, juga memperlihatkan keseimbangan netral. Hal ini disebabkan karena tekanan uap hanya tergantung pada suhu, sehingga selama kedua fase masih ada, perubahan volume hanya akan menimbulkan pengembangan (kondensasi) atau penguapan, tanpa menimbulkan perubahan tekanan dan sistem tetap seimbang dengan lingkungannya.

### 3. Keseimbangan metastabil

Sebuah bola yang terletak pada cekungan kecil dari sebuah permukaan cembung hanya stabil untuk simpangan kecil. Suatu campuran gas hidrogen dengan oksigen di dalam bejana yang terisolasi secara termal, juga hanya stabil untuk penyimpangan kecil. Pemampatan yang kuat dapat menimbulkan kenaikan suhu yang cukup untuk menyebabkan campuran itu meledak.

## D. Proses

Proses ialah perubahan sistem dari satu keadaan ke keadaan yang lain. Proses kuasistatik adalah proses yang merupakan rentetan keadaan seimbang tak terhingga banyak. Setiap saat keadaan seimbang itu hanya menyeimbangkan sedikit dari keadaan seimbang sebelumnya. Jika kondisi proses kuasistatik tak dipenuhi maka proses disebut

nonkuasistatik. Sebagai contoh, sebuah bejana yang dilengkapi dengan piston berisi sejumlah zat. Di atas piston diletakkan 2 buah anak timbangan masing-masing dengan massa 1 kg. Jika satu anak timbangan diambil, maka tekanan dan volume gas akan berubah. Jadi sistem ini menjalani suatu proses dan proses ini adalah nonkuasistatik, sebab bukan merupakan rentetan keadaan seimbang tak terhingga banyak, melainkan hanya dua keadaan seimbang (awal dan akhir). Tetapi jika salah satu anak timbangan itu diganti dengan sejuta butir kecil-kecil anak timbangan dengan massa total 1 kg, dan satu per satu butir-butir itu diambil, maka proses ini adalah kuasistatik. Proses kuasistatik adalah *reversibel* (terbalikkan), sebab diketahui jalan yang dilalui, sedangkan proses nonkuasistatik adalah *ireversibel* (tak terbalikkan), sebab tak diketahui jalan yang dilalui. Adapun yang dimaksud dengan proses reversibel adalah proses yang dapat dibalik arahnya melalui jalan yang sama demikian rupa sehingga sistem dan lingkungan kembali seperti semula. Jika tak dipenuhi persyaratan tersebut, maka sistem disebut ireversibel.

## E. Variabel Intensif dan Ekstensif

Variabel intensif ialah variabel yang nilainya tak tergantung pada massa sistem, misalnya: tekanan, suhu, kerapatan. Variabel ekstensif adalah variabel yang nilainya tergantung pada massa sistem, misalnya: volume, energi dalam (*internal energy*), entropi. Variabel ekstensif bila dibagi dengan massa atau jumlah mol sistem menjadi variabel intensif dan disebut nilai jenis (*specific value*). Selanjutnya akan digunakan lambang huruf besar untuk variabel ekstensif dan huruf kecil untuk variabel intensif. Perkecualian untuk perjanjian ini ialah variabel suhu walaupun intensif akan digunakan lambang huruf  $T$  (besar). Sebagai misal: jika  $V$  adalah volume zat,  $m$  massa zat dan  $n$  jumlah mol zat dalam sistem, maka:

$$v = \frac{V}{m} \quad \text{volume jenis}$$

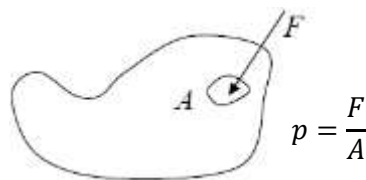
$$v = \frac{V}{n} \quad \text{volume jenis molar}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad \text{kerapatan atau massa jenis}$$

Kerapatan adalah kebalikan volume jenis, yang sering juga disebut massa jenis, analog dengan berat (bobot) jenis. Konsep variabel ekstensif dan intensif lain yang sering dijumpai dalam termodinamika adalah  $C$  kapasitas kalor, jika dibagi dengan massa  $m$  atau jumlah mol  $n$  maka akan menjadi  $c$  kapasitas kalor jenis kilogram dan kapasitas kalor jenis molar.

## F. Tekanan

Tekanan merupakan gaya persatuan luas. Dalam medium fluida, tekanan disebut tekanan hidrostatis, jika tekanan itu pada suatu unsur luas baik dalam medium ataupun pada permukaannya adalah tegak-lurus pada unsur itu dan tak tergantung pada orientasinya. Sebagai contoh misalnya tekanan di dalam fluida yang tenang (*fluid at rest*). Satuan tekanan dalam sistem SI adalah  $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$  (Pascal). Satuan-satuan lain yang sering digunakan adalah: bar, atm (atmosfer) dan Torr (torricelli).



**Gambar 1.2.** Gaya yang dialami pada suatu luasan

dengan definisi:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^6 \text{ dyn/cm}^2$$

$$1 \mu\text{bar} = 10^{-1} \text{ Pa} = 1 \text{ dyn/cm}^2$$

Tekanan hidrostatis disuatu tempat oleh fluida setinggi  $h$  apabila kerapatannya  $\rho$  dapat dirumuskan sebagai

$$p = \rho gh \tag{1.1}$$

Tekanan sebesar 1 atm didefinisikan sebagai tekanan oleh kolom raksa setinggi 76 cm dengan kerapatan  $13,5951 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  di suatu tempat dengan  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$  ( $g$  standar).

$$1 \text{ atm} = 1,013 25 \times 10^5 \text{ Pa} \approx 1 \text{ bar}$$

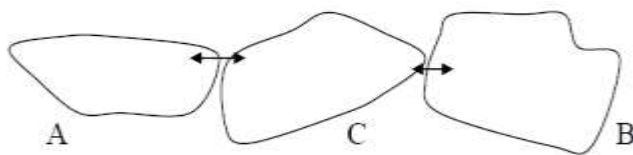
Tekanan sebesar 1 Torr adalah tekanan raksa setinggi 1 mm pada  $g$  standar.

$$1 \text{ Torr} = 1/760 \text{ atm} = 133,3 \text{ Pa}$$

## G. Hukum ke Nol Termodinamika

Apabila dua benda disentuhkan, setelah sekian lama tidak ada lagi perubahan suhu pada masing-masing benda terjadi keseimbangan termal. Jadi, bila dua benda mengalami keseimbangan termal ketika kontak, maka dua benda tersebut memiliki temperatur yang sama, dan berlaku sebaliknya bila dua buah benda memiliki suhu sama, maka ketika kontak akan terjadi keseimbangan termal.

Hukum ini menyatakan bahwa: *Apabila dua benda mempunyai kesamaan suhu dengan benda ketiga, maka kedua benda itu satu dengan yang lain juga mempunyai kesamaan suhu.*



**Gambar 1.3.** Keseimbangan Termal untuk Benda A, B, dan C

Dengan kata lain: apabila benda A dan B secara terpisah dalam keadaan seimbang termal dengan benda C, maka A dan B satu dengan yang lain juga dalam keadaan seimbang termal. Andaikan bahwa benda C adalah sebuah termometer raksa, sedangkan benda A dan B adalah dua silinder berisi air. Hukum ini mengatakan bahwa apabila tidak terjadi suatu perubahan saat dilakukan kontak termal antara termometer itu baik dengan A maupun B, maka tidak pula akan terjadi perubahan saat diadakan kontak termal antara A dan B.

Apabila orang memilih untuk mendefinisikan suhu sebagai apa yang terbaca pada termometer raksa itu, maka hukum ke nol ini hanyalah mengatakan apabila dua benda mempunyai suhu yang sama, maka keduanya akan berada pada keseimbangan termal, saat dilakukan kontak termal. Hukum ini merupakan dasar untuk pengukuran suhu.

### 1. Skala Suhu

Skala yang digunakan untuk mengukur suhu dalam satuan SI adalah skala Celsius, dengan lambang  $^{\circ}\text{C}$ . Hingga tahun 1954 skala ini didasarkan pada dua titik tetap, yaitu titik es (*ice point*) dan titik uap (*steam point*). Suhu pada titik es didefinisikan sebagai

suhu campuran es dengan air dalam keadaan seimbang dengan udara jenis pada tekanan 1 atmosfer. Suhu pada titik uap adalah suhu air dan uap yang berada dalam keseimbangan pada tekanan 1 atmosfer. Kedua titik ini diberi angka 0 dan 100 pada skala Celsius.

Pada CGPM yang ke 10 pada tahun 1954, skala Celsius didefinisikan kembali dalam ungkapan satu titik tetap. Titik tetap itu adalah titik tripel air, yaitu keadaan dimana ketiga fase air dalam keseimbangan. Titik *tripel* ini diberi angka  $0,01^{\circ}\text{C}$ . Dengan skala ini maka secara eksperimental titik uap ternyata  $100,00^{\circ}\text{C}$ . Jadi ada persamaan antara skala suhu yang lama dengan yang baru. Disamping skala suhu seperti tersebut diatas, terdapat pula skala suhu mutlak yang didasarkan pada hukum kedua termodinamika. Skala ini disebut pula sebagai skala Kelvin dan dinyatakan dengan lambang K (tanpa lambang derajat). Hubungan antara kedua skala tersebut adalah

$$T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \quad (1.2)$$

Dalam tahun 1967, CGPM mendefinisikan K sebagai  $1/(273,16)$  dari suhu titik tripel air. Jadi suhu titik tripel air itu sendiri 273,16 K. Skala Celsius kemudian didefinisikan dengan perantaraan Persamaan (1.2) diatas.

## 2. Mengukur Suhu

Suhu adalah suatu besaran skalar yang dipunyai oleh semua sistem termodinamika demikian rupa sehingga kesamaan suhu adalah syarat yang perlu dan cukup untuk keseimbangan termal. Banyak besaran fisis yang berubah dengan suhu. Beberapa diantaranya adalah volume cairan, panjang batang, hambatan listrik pada kawat, tekanan gas pada volume tetap, volume gas pada tekanan tetap, warna filamen lampu. Zat-zat yang mempunyai sifat demikian itu dinamakan zat termometrik (*thermometric substance*). Besaran-besaran fisis yang berubah dengan suhu tersebut disebut sifat termometrik (*thermometric property*), yang untuk selanjutnya diberi lambang  $X$ . Perubahan nilai  $X$  ini dianggap linier dengan suhu  $T$ . Jadi hubungan ini dapat dinyatakan sebagai

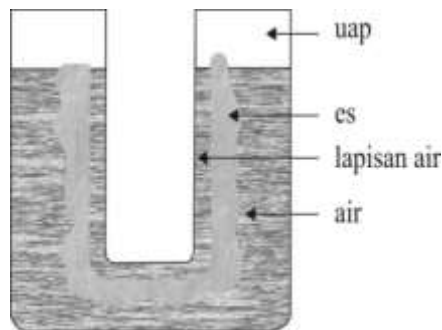
$$T = aX \quad (1.3)$$

Rasio dua suhu empiris  $T_2$  dan  $T_1$  didefinisikan sama dengan rasio nilai sifat termometrik  $X_2$  dan  $X_1$  yang bersangkutan.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{X_2}{X_1} \quad (1.4)$$

Selanjutnya perlu ditetapkan nilai numerik suatu suhu tertentu yang disebut titik tetap standar (*standar fixed point*). Berdasarkan kesepakatan internasional, titik tetap yang dipilih adalah titik tripel air, yaitu suhu yang berkaitan dengan keberadaan bersama es, air, dan uap air dalam keseimbangan. Tekanan pada titik ini ternyata 4,58 mmHg dan suhunya diberi nilai 0,01 °C. Ternyata pula bahwa tiap zat hanya mempunyai satu titik tripel saja, walaupun berbeda antara zat yang satu dengan zat yang lain.

Untuk memperoleh titik tripel air, maka air dengan kemurnian tinggi yang mempunyai komposisi isotop seperti air dalam air laut, didistilasi kedalam bejana yang tampang lintang vertikalnya berbentuk huruf U rangkap (Gambar 1.4).



**Gambar 1.4.** Sel titik tripel

Jika udara di dalamnya telah habis karena terdesak oleh air distilasi ini, bejana lalu ditutup. Dengan memasukkan campuran pembeku ke dalam ruang ditengah antara kedua kaki tabung, maka terbentuklah lapisan es disekitar dinding bagian dalam, sedang dibagian atas terkumpul uap air. Jika campuran pendingin disingkirkan dan diganti dengan termometer, maka sebagian lapisan es akan meleleh. Namun selama ketiga fase itu masih berada bersama, sistem tetap pada titik tripel.

Jika suhu titik tripel ini dinamakan  $T_3$  dan nilai sifat termometrik yang bersangkutan dimana  $X_3$ , maka suhu empiris  $T$  jika nilai sifat termometriknya  $X$  dinyatakan dalam bersamaan



$$\frac{T}{T_3} = \frac{X}{X_3}$$

atau

$$T = \frac{X}{X_3} T_3 \quad (1.5)$$

Apabila bermacam termometer yang terbuat dari zat termometrik yang berbeda dan dengan sifat termometrik yang berbeda pula, digunakan untuk mengukur suhu, misalnya titik didih air, ternyata nilai yang ditunjuk berbeda antara satu dengan yang lain. Yang menunjukkan perbedaan kecil adalah termometer yang terbuat dari gas pada volume tetap, walaupun terbuat dari bermacam gas. Oleh karena itu maka gas dipilih sebagai zat termometrik standar. Ternyata bahwa jika banyaknya gas yang dipakai dalam termometer itu dikurangi, dengan demikian tekanannya juga berkurang, maka perbedaan nilai yang ditunjukkan oleh masing-masing termometer gas ini menjadi lebih kecil. Jika volume gas dibuat tetap, maka tekanannya berubah dengan suhu, tekanan itu akan naik bila suhunya naik. Jadi pada termometer gas ini digunakan tekanan pada volume tetap sebagai sifat termometrik.

Sebagaimana telah dijelaskan bahwa titik tripel air diberi nilai 273,16 K. oleh karena itu Persamaan (1.5) dapat dituliskan menjadi

$$T = \frac{X}{X_3} 273,16 \text{ K} \quad (1.6)$$

Untuk termometer gas pada volume tetap menjadi

$$T = \frac{P}{P_3} 273,16 \text{ K} \quad (1.7)$$

Misalnya botol termometer gas volume tetap ini diisi dengan sejumlah gas. Termometer gas ini kemudian digunakan untuk mengukur suhu titik tripel air. Misalkan tekanan yang ditunjukkan adalah  $P_{31}$ . Jadi tekanan sebesar  $P_{31}$  ini setara dengan suhu 273,16 K. Selanjutnya termometer ini digunakan untuk mengukur suhu titik uap (titik didih air) pada tekanan udara luar 1 atm. Misalkan tekanan yang ditunjukkan  $P_{u1}$ . Jadi suhu titik uap  $T_u$  adalah

$$T_{u1} = \frac{P_{u1}}{P_{31}} \times 273,16 \text{ K} \quad (1.8)$$

Setelah itu gas dalam botol termometer dikurangi, lalu digunakan untuk mengukur titik tripel air lagi. Tekanan yang ditunjukkan lebih rendah, namakan  $P_{32}$ . Pengukuran berikutnya dilakukan pada titik uap, dan diperoleh nilai  $P_{u2}$ . Jadi suhu titik uap adalah

$$T_{u2} = \frac{P_{u2}}{P_{32}} \times 273,16 \text{ K} \quad (1.9)$$

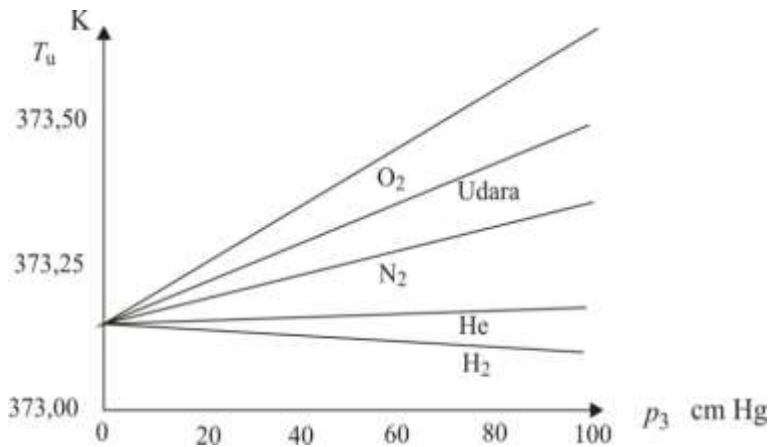
Kalau proses ini diteruskan, sehingga diperoleh data yang cukup, maka secara umum suhu titik uap atau titik didih air ini dapat dirumuskan sebagai

$$T_{un} = \frac{P_{un}}{P_{3n}} \times 273,16 \text{ K} \quad (1.10)$$

Dari data tersebut dibuat grafik suhu titik uap sebagai fungsi  $P_{3n}$  dan selanjutnya diekstrapolasi ke  $P_{3n} = 0$ . Proses ini dilakukan juga terhadap gas-gas yang lain. Hasil yang diperoleh seperti pada Gambar 1.3. Ternyata bahwa pada pengukuran suhu dengan termometer gas volume tetap, maka untuk  $P_3 \rightarrow 0$  diperoleh hasil yang sama untuk semua jenis gas, yaitu  $T_u = 373,15 \text{ K}$ . Karena itu hasil yang diperoleh pada pengukuran suhu dengan termometer gas volume tetap dapat dirumuskan sebagai

$$T = \lim_{P_3 \rightarrow 0} \left[ \frac{P}{P_3} \right]_V \times 273,16 \text{ K} \quad (1.11)$$

Selanjutnya termometer gas volume tetap ini dipilih sebagai termometer standar. Suhu terendah yang dapat diukur dengan termometer gas kira-kira 1 K. Untuk memperoleh



**Gambar 1.5** Penentuan suhu titik uap dengan termometer gas

suhu serendah ini harus digunakan gas helium pada tekanan rendah, karena helium menjadi cair pada suhu yang lebih rendah dari pada gas-gas yang lain.

Apabila suhu titik didih air normal atau titik uapnya diberi lambang  $T_u$ , dan suhu titik beku air (titik es) diberi lambang  $T_e$ , maka

$$\frac{T_u}{T_e} = \left[ \frac{P_u}{P_e} \right]_V \text{ dan } T_u - T_e = 100 \text{ (skala)}$$

Dari kedua persamaan ini diperoleh

$$T_e = \frac{100}{(P_u/P_e)^{-1}} \quad (1.12)$$

Nilai terbaik yang diperoleh dari hasil eksperimen, menunjukkan bahwa  $P_u/P_e = 1,3661$ , sehingga dari Persamaan (1.12) diperoleh suhu titik es adalah

$$T_e = \frac{100}{1,3661-1} = 273,15 \text{ K} \quad (1.13)$$

Titik tripel diketahui dari eksperimen 0,01 K diatas titik es. Jadi titik tripel

$$T_3 = 273,16 \text{ K} \quad (1.14)$$

Suhu dalam satuan derajat C atau °C mempunyai hubungan dengan satuan Kelvin (K) menurut persamaan

$$T_c = T_K - T_e \quad (1.15)$$

$T_e$  suhu titik es = 273,15 K. Sehingga persamaan (1.15) boleh ditulis menjadi

$$T_c = T_K - 273,15 \quad (1.16)$$

Misalnya suhu titik es kalau dinyatakan dalam °C menjadi

$$\begin{aligned} T_e &= 273,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K} = 0 \text{ skala Kelvin} \\ &= 0 \text{ skala Celsius} = 0 \text{ skala di atas } 0^\circ \text{C} \\ &= 0^\circ \text{C} \end{aligned}$$

Jadi suhu titik es adalah

$$T_e = 0^\circ \text{C}$$

Suhu titik triple air

$$\begin{aligned} T_3 &= 273,16 \text{ K} - 273,15 \text{ K} = 0,01 \text{ skala K} \\ &= 0,01 \text{ skala C} = 0,01 \text{ skala di atas } 0^\circ \text{C} \\ &= 0,01^\circ \text{C}. \end{aligned}$$

Jadi titik triple air adalah

$$T_3 = 0,01^\circ \text{C}$$

Suhu titik uap

$$\begin{aligned} T_u &= 373,15 \text{ K} - 273,15 \text{ K} = 100,00 \text{ skala K} \\ &= 100 \text{ skala C} = 100 \text{ skala di atas } 0^\circ \text{C} \\ &= 100^\circ \text{C} \end{aligned}$$

Jadi suhu titik uap adalah

$$T_u = 100^\circ \text{C}$$

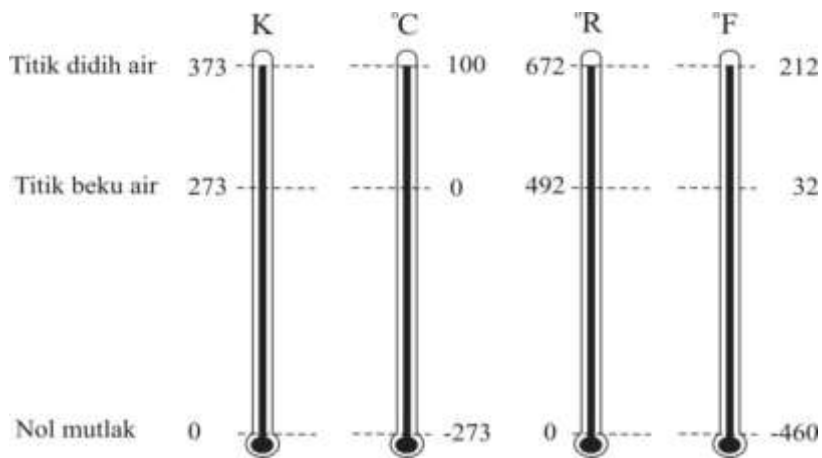
Selain satuan K dan °C, suhu di beberapa negara seperti Amerika Serikat, lazim pula dinyatakan dalam satuan Rankine (R) dan Fahrenheit (°F). Hubungan antara keempat satuan suhu ini dapat dilihat pada Gambar 1.6.

Hubungan antar skala Rankine dan skala Kelvin adalah

$$1 \text{ skala } R = \frac{5}{9} \text{ skala } K \quad (1.17)$$

Jadi dengan faktor konversi

$$\frac{5 K}{9 R} \text{ atau } \frac{9 R}{5 K} \quad (1.18)$$



**Gambar 1.6.** Perbandingan 4 macam satuan suhu

Beberapa nilai yang tercantum pada Gambar 1.6 diatas adalah nilai-nilai setelah mengalami pembulatan. Misalnya suhu titik es

$$T_e = 273,15 \text{ K} = 273,15 \text{ K} \times \frac{9 R}{5 K} = 491,67 \text{ R}$$

yang dibulatkan menjadi 492 R. Suhu titik uap

$$T_u = 373,15 \text{ K} = 373,15 \text{ K} \times \frac{9 R}{5 K} = 671,67 \text{ R}$$

yang dibulatkan menjadi 672 R.

Hubungan antara satuan °C dengan satuan °F adalah

$$T_F = \frac{9}{5} T_C + 32 \quad (1.19)$$

atau

$$T = \frac{5}{9} (T_F - 32) \quad (1.20)$$

Hubungan antara satuan °F dengan satuan K dapat dicari sebagai berikut.

$$T_c = T_K - 273,15 \quad (1.21)$$

Dari persamaan (1.19) dan (1.21) diperoleh

$$T_F = \frac{9}{5}(T_K - 255,37) \quad (1.22)$$

Misalnya untuk titik nol mutlak:

$$T_F = \frac{9}{5}(0 - 255,37) \text{ °F} = -459,67 \text{ °F}$$

yang juga dibulatkan menjadi -460°F.

Untuk titik es:

$$T_F = \frac{9}{5}(273,15 - 255,37) \text{ °F} = 32,004 \text{ °F}$$

dan hasil ini juga dibulatkan menjadi 32°F.

Mengkonversi nilai suhu berdasarkan skala temperatur yang diinginkan dapat menggunakan rumus interpolasi linear. Dalam matematika interpolasi linear diungkapkan sebagai,

$$\frac{X-X_b}{X_a-X_b} = \frac{Y-Y_b}{Y_a-Y_b} \quad (1.23)$$

atau

$$X = \frac{Y-Y_b}{Y_a-Y_b}(X_a - X_b) + X_b \quad (1.24)$$

dengan  $X$  merupakan titik/nilai yang dicari,  $X_a$  dan  $Y_a$  merupakan titik atau nilai atas yang setara dari dua satuan yang dikonversikan,  $X_b$  dan  $Y_b$  merupakan titik/ nilai bawah yang setara dari dua satuan yang dikonversi.

Persamaan (1.2) dan (1.16) menggambarkan kesetaraan skala Celcius dan Kelvin, persamaan tersebut dapat diuji dengan persamaan interpolasi linear. Jika titik beku es dalam skala Celcius adalah 0, dan dalam skala Kelvin sebesar 273,15, serta titik didih air dalam skala Celcius adalah 100 dan dalam skala Kelvin sebesar 373,15, maka dengan menggunakan Persamaan (1.24), maka kesetaraan skala Celcius dan skala Kelvin sebagai berikut,

$$T_c = \frac{T_K-273,15}{375,15-273,15}(100 - 0) + 0$$

$$T_c = T_K - 273,15 \quad (1.25)$$

Persamaan (1.2), (1.16) dan (1.25) adalah identik. Persamaan (1.19) yang menggambarkan kesetaraan skala Fahrenheit dan skala Celcius, dengan memperhatikan

titik beku dan didih air seperti ditunjukkan pada Gambar 1.6 maka dengan menggunakan rumus interpolasi linear diperoleh,

$$T_F = \frac{(T_c - 0)}{(100 - 0)}(212 - 32) + 32$$

$$T_F = \frac{T_c}{100} 180 + 32$$

$$T_F = \frac{9}{5} T_c + 32 \quad (1.26)$$

Terlihat bahwa Persamaan (1.19) dan (1.26) adalah identik dengan demikian kita dapat menentukan nilai temperatur pada suatu skala ke skala lain dengan menggunakan rumus interpolasi linear.

## H. Contoh Soal



Contoh

1.1

Kerapatan air  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ . Hitunglah: (a) kerapatan air dalam satuan MKS dan SI, (b) volume jenis dalam satuan MKS dan SI, (c) volume jenis molar dalam satuan MKS dan SI.

### Penyelesaian

*Diketahui:*  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$

*Ditanya:* (a) kerapatan air dalam satuan MKS dan SI,

(b) volume jenis dalam satuan MKS dan SI=90

(c) volume jenis molar dalam satuan MKS dan SI.

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

(a)  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3 = 1 (10^{-3} \text{ kg}) (10^{-2} \text{ m})^{-3} = 10^3 \text{ kg/m}^3$  (MKS, SI)

(b)  $v = V/m = 1/\rho = 1/(10^3 \text{ kg m}^{-3}) = 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  (MKS, SI)

(c)  $v' = V/n = V/(m/M) = (V/m)M = vM$  (M bobot molekul)

Jadi  $v' = 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} (18 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}) = 18 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$  (MKS)

dan  $v' = 18 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot (10^3 \text{ mol})^{-1} = 18 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$  (SI)

Periksa Kembali



Contoh

1.2

Buktikanlah bahwa tekanan  $1 \text{ atm} = 1,013\,25 \times 10^5 \text{ Pa}$ , dan buktikanlah pula  $1 \text{ atm} = 1,013\,25 \times 10^6 \text{ dyn.cm}^{-2}$ .

### Penyelesaian

*Diketahui:* tekanan  $1 \text{ atm} = 1,013\,25 \times 10^5 \text{ Pa}$

*Ditanya:* buktikanlah  $1 \text{ atm} = 1,013\,25 \times 10^6 \text{ dyn.cm}^{-2}$ .

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*  $p = \rho gh$

$$p = (13,595\,1 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3})(9,806\,65 \text{ m.s}^{-2})(0,76 \text{ m})$$

$$= 1,013\,25 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (\text{MKS, SI})$$

$$p = (13,595\,1 \text{ g.cm}^{-3})(980,665 \text{ cm.s}^{-2})(76 \text{ cm})$$

$$= 1,013\,25 \times 10^6 \text{ dyn.cm}^{-2} \quad (\text{CGS})$$

Periksa Kembali



Contoh

1.3

Tekanan gas sempurna pada volume tetap dinyatakan oleh persamaan

$$p = AT$$

dengan  $A$  adalah tetapan dan  $T$  suhu termodinamik. Misalkan suatu suhu  $T^*$  didefinisikan sebagai

$$T^* = B \ln CT$$

dengan  $B$  dan  $C$  tetapan. Pada titik tripel air, gas menunjukkan tekanan  $p = 0,1 \text{ atm}$  dan suhu  $T^* = 0$  derajat; sedangkan pada titik Uap, suhu  $T^* = 100$  derajat. (a) Carilah nilai  $A$ ,  $B$  dan  $C$ . (b) Carilah nilai  $T^*$  jika  $p = 0,15 \text{ atm}$ . (c) Carilah nilai  $P$  jika  $T^* = 50$  derajat. (d) Berapakah nilai  $T^*$  pada  $0$  mutlak (K)? (e) Buatlah grafik  $T^*$  sebagai fungsi suhu Celsius  $T$  untuk  $-200^\circ\text{C} < T < 200^\circ\text{C}$ .

### Penyelesaian

*Diketahui:*  $p = 0,1 \text{ atm}$

$T^* = 0$  derajat

$T^* = 100$  derajat





*Ditanya:* (a) Carilah nilai  $A$ ,  $B$  dan  $C$

(b) Carilah nilai  $T^*$  jika  $p = 0,15 \text{ atm}$

(c) Carilah nilai  $P$  jika  $T^* = 50$  derajat

(d) Berapakah nilai  $T^*$  pada 0 mutlak (K)?

(e) Buatlah grafik  $T^*$  sebagai fungsi suhu Celsius  $T$  untuk  $-200^\circ\text{C} < T < 200^\circ\text{C}$ .

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*  $p = AT$  dan  $T^* = B \ln CT$

(a) Dari data diatas diperoleh

$p = AT$  menjadi:

$$0,1 \text{ atm} = A \times 273,16 \text{ K}, \text{ atau}$$

$$A = 3,66 \times 10^{-4} \text{ atm K}^{-1}$$

$T^* = B \ln CT$  menjadi :

$$0 = B \ln(C \times 273,16 \text{ K}) = \ln(C \times 273,16 \text{ K})^B \quad (\text{A})$$

$$100 = B \ln(C \times 373,15 \text{ K}) = \ln(C \times 373,15 \text{ K})^B \quad (\text{B})$$

dari Persamaan (A) diperoleh :

$$(C \times 273,16)^B = 1 \text{ atau } C^B = \frac{1}{(273,16 \text{ K})^B} \quad (\text{C})$$

dari Persamaan (B) diperoleh:

$$(C \times 373,15)^B = e^{100} \text{ atau } C^B = \frac{e^{100}}{(373,15 \text{ K})^B} \quad (\text{D})$$

dari Persamaan (C) dan (D) diperoleh:

$$e^{100} = \frac{(373,15)^B}{(273,16)^B} \text{ atau } 100 = B \ln \frac{373,15}{273,16} \text{ atau}$$

$$B = 100 / \ln \frac{373,15}{273,16} = 320,59 \cong 321 \text{ (derajat)}.$$

*Catatan:*  $B$  tentunya mempunyai satuan yang sama dengan satuan untuk  $T^*$ , yaitu derajat.



Dari Persamaan (C) diperoleh  $C = 1/(273,16 \text{ K})$

Jadi,  $C = 3,66 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

$$(b) AT \text{ atau } T = \frac{p}{A} = \frac{0,15 \text{ atm}}{3,66 \times 10^{-4} \text{ atmK}^{-1}}$$

Jadi,  $T = 409,8 \text{ K}$

$$T^* = B \ln CT = 320,59 \ln(3,66 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \times 409,8 \text{ K})$$

$T^* = 130$  derajat

$$(c) T^* = B \ln CT \text{ yang dapat diubah menjadi } T = \frac{e^{T^*/B}}{C}$$

$$T = \frac{e^{50/320,59}}{3,66 \times 10^{-3}} \text{ K} = 319,34 \text{ K}$$

$$p = AT = 3,66 \times 10^{-4} \text{ atm K}^{-1} \times 319,34 \text{ K} = 0,12 \text{ atm}$$

$$(d) T^* = B \ln CT = B \ln(C \times 0) = -\infty$$

$$(e) T^* = B \ln CT = B \ln C(T + 273) = B \ln C + B \ln(T + 273)$$

Jika nilai  $B$  dan  $C$  dimasukkan, diperoleh:

$$T^* = 321 \ln(3,66 \times 10^{-3}) + 321 \ln(T + 273)$$

atau

$$T^* = -1800,9 + 321 \ln(t + 273)$$

$$\text{Untuk } T = -200 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{maka } T^* = -423,66^\circ$$

$$T = -150 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{maka } T^* = -256,19^\circ$$

$$T = -100 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{maka } T^* = -179,57^\circ$$

$$T = -50 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{maka } T^* = -65,20^\circ$$

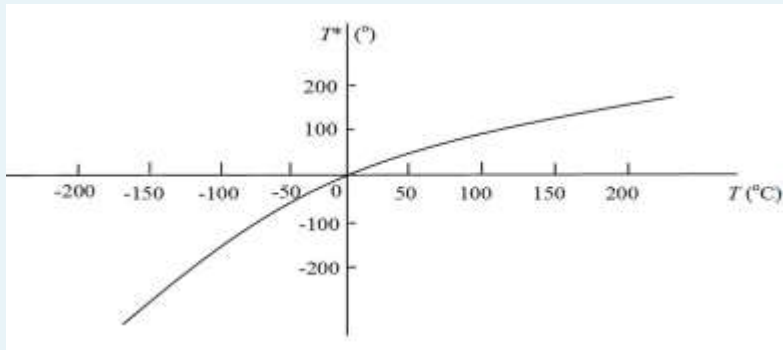
$$T = 0 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{maka } T^* = -0,26^\circ$$

$$T = 50 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{maka } T^* = 53,73^\circ$$

$$T = 100 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{maka } T^* = 99,93^\circ$$

$$T = 150 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{maka } T^* = 140,31^\circ$$

$$T = 200 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{maka } T^* = 176,17^\circ$$



**Gambar 1.7.** Grafik  $T^*$  sebagai fungsi  $T$ , suhu Celcius

Periksa  
Kembali



## 1. Soal Latihan



Latihan

1

Pada tabel di bawah ini bilangan-bilangan pada baris atas menyatakan tekanan pada termometer gas volume tetap, jika dimasukkan kedalam sel titik tripel air. Bilangan-bilangan pada baris bawah menyatakan tekanan jika termometer dimasukkan kedalam zat yang suhunya tak diketahui. Tentukanlah suhu mutlak zat tersebut, sampai dengan 5 angka penting atau bermakna (significant figures).

$p_3$ , mm Hg	1000,0	750,00	500,00	250,00
$p$ , mm Hg	1535,3	1151,6	767,82	383,95

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Suatu hambatan  $R$  yang terbuat dari karbon khusus memenuhi persamaan

$$\left[ \frac{\log R}{T} \right]^{1/2} = a + b \log R$$

dengan  $a = -1,16$  dan  $b = 0,675$ . Dalam kriostat yang berisi helium cair, hambatan itu tepat menunjukkan  $1000 \Omega$ . Berapakah suhu helium itu?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Hambatan suatu kristal germanium mengikuti persamaan

$$\log R = 4,697 - 3,917 \log T$$

Di dalam suatu kriostat helium cair, hambatan menunjukkan  $218 \Omega$ . Berapakah suhunya?

#### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali

## J. Tugas



Tugas

1

Kerapatan udara  $\rho = 0,00129 \text{ g/cm}^3$  dan bobot molekulnya  $M = 29$ . Hitunglah (a) kerapatannya dalam sistem MKS dan SI, (b) volume jenisnya dalam sistem MKS dan SI, (c) volume jenis molarnya dalam sistem MKS dan SI.

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Sebuah benda ditimbang pada ketinggian 10000 m yang mempunyai percepatan gravitasi  $g = 9,778 \text{ m/s}^2$  dengan sebuah timbangan spiral yang telah ditera pada permukaan laut. Pada penimbangan ini terbaca 10 N. Berapakah massa benda?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali





Sejumlah gas terdapat dalam sebuah silinder vertikal yang dilengkapi dengan piston. Tekanan udara luar adalah 1 bar dan luas piston  $500 \text{ mm}^2$ . Berapakah massa piston jika tekanan gas di dalam silinder 125 kPa? Diandaikan bahwa tempat yang bersangkutan mempunyai  $g$  standard.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Sebuah manometer berisi cairan yang kerapatannya  $800 \text{ kg/m}^3$ . Berapakah selisih tekanan yang ditunjukkan jika perbedaan tinggi kedua kolom cairan 400 mm? berapakah perbedaan tinggi kedua kolom jika selisih tekanan yang sama diukur dengan manometer yang berisi raksa yang kerapatannya  $13600 \text{ kg/m}^3$ ?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Permukaan air dalam tanki yang tertutup adalah 40 m dari dasar. Tekanan udara di atas air 120 kPa, dan kerapatan air  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Berapakah tekanan air pada alasnya?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



### A. Teori Kinetik Gas

Setiap zat terdiri atas atom-atom. Kemudian, atom akan membentuk molekul-molekul. Atom dan molekul ini disebut sebagai partikel. Teori yang menggunakan tinjauan tentang gaya antara partikel-partikel dan energi partikel-partikel tersebut untuk menerangkan sifat-sifat zat disebut teori kinetik zat. Pada bahasan ini, teori kinetik zat diterapkan pada partikel-partikel gas yang disebut dengan teori kinetik gas. Teori ini didasarkan atas momentum dan energi partikel gas. Pada umumnya, teori kinetik diterapkan pada gas karena teori kinetik ini paling mudah dipahami dan paling sesuai untuk gas.

Dasar-dasar teori kinetik gas telah ditulis oleh David Bernoulli (1738), Kronig (1856), Clausius (1857), Maxwell (1860), dan Boltzmann (1868). Teori kinetik gas pertama kali dikemukakan oleh Boltzmann. Sebagai latar belakang uraian mengenai teori kinetik gas, patut dikemukakan di sini apa yang dinamakan gerak Brown. Gejala gerak Brown itu pertama kali ditemukan seorang ahli botani Inggris dalam penyelidikannya terhadap bakteri-bakteri yang telah diperkirakan sudah mati dalam air yang mendidih. Dalam hal ini ia melihat melalui mikroskop, bahwa makin panas air itu, ternyata makin kacau gerakannya. Karena Brown hanyalah seorang ahli botani, maka hal itu menjadi teka-teki baginya. Pada waktu itu sejalan mulainya berkembang pandangan atomisme, terutama dalam lapangan ilmu kimia di bawah kepeloporan Dalton, Lavoiser, Avogadro, dan lain-lain, maka Boltzmann-lah yang berhasil pertama kali memberi analisis tentang kebenaran pandangan atomisme materi itu.

Berdasarkan gejala gerak Brown yang disebutkan di atas oleh Boltzmann, hal itu ditafsirkan bahwa bakteri yang bergerak kacau itu sebenarnya benar-benar telah mati. Adapun yang menyebabkan mereka bergerak dengan kacau ialah tumbukan yang dilakukan oleh molekul-molekul air yang makin meningkat gerakannya sejalan dengan

makin besarnya kalor yang diserap oleh sistem dari lingkungan luarnya. Selain itu, dengan makin meningkatnya pemanasan, molekul-molekul air makin renggang yang diserapnya juga makin besar, sehingga pada akhirnya semuanya akan menguap. Segera dapat diperkirakan bahwa zat dalam keadaan gas, gerak molekul-molekul juga makin bebas sehingga kekacauan geraknya juga akan makin meningkat pula sejalan dengan bertambah tingginya suhu gas.

Tinjauan teori kinetik pada sifat gas secara keseluruhan merupakan hasil rata-rata kelakuan gas tersebut, dengan anggapan bahwa gas tersebut merupakan gas ideal. Teori kinetik gas ini akan memperlihatkan hubungan antara besaran-besaran mikroskopik partikel gas secara rata-rata, misalnya energi kinetik partikel gas.

Pada Bab ini, pembahasan dibatasi pada gas ideal. Dalam kenyataannya, gas yang bersifat ideal tidak ditemukan. Akan tetapi, gas pada tekanan rendah dan pada suhu kamar dapat dianggap mempunyai sifat gas ideal.

Pembahasan teori kinetik gas berkaitan erat dengan hubungan antara besaran-besaran yang menentukan keadaan gas. Keadaan gas yang menempati sebuah ruang tertutup ditentukan oleh volume ( $V$ ), tekanan ( $p$ ), dan temperatur gas ( $T$ ). Besaran-besaran yang menentukan keadaan gas ini disebut variabel keadaan. Dalam membahas hubungan antara variabel-variabel keadaan, di sini hanya menggunakan teori kinetik gas karena interaksi-interaksi di antara atom-atom dalam gas adalah jauh lebih lemah daripada di dalam cairan dan benda padat.

Teori kinetik gas menjembatani/ menghubungkan antara tinjauan makroskopik dengan mikroskopik dan pelengkap tinjauan Termodinamika Klasik. Sifat-sifat makroskopis gas adalah sifat-sifat yang dapat diukur seperti volum, tekanan, suhu dan massa. Sifat-sifat mikroskopis gas adalah sifat-sifat yang didasarkan pada kelakuan molekul-molekul gas. Misalnya tekanan biasa dijelaskan dengan menggunakan sifat-sifat makroskopis. Dengan teori kinetik gas yang menekankan pembahasan gaya dan gerak partikel gas, dapat diperoleh hubungan tekanan dan temperatur ( $T$ ) dengan gerak partikel gas, lebih dari itu dapat diperoleh kapasitas termal gas.

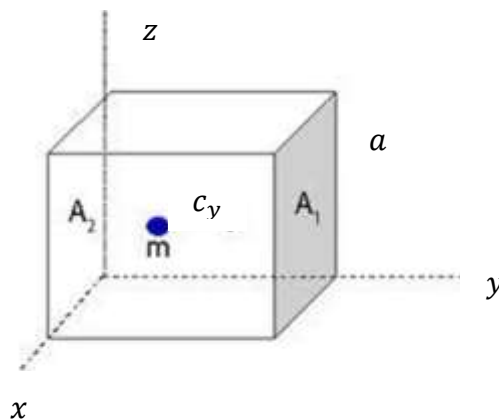
## B. Gas Ideal (Gas Sempurna)

Menurut teori kinetik gas, gas-gas terdiri atas molekul-molekul yang senantiasa bergerak tak beraturan kian kemari sambil berbenturan sesamanya dan juga dengan dinding bejana yang ditempatinya. Tekanan pada dinding gas bejana disebabkan oleh benturan molekul-molekul gas dengan dinding bejana tersebut. Semua benturan itu adalah lenting sempurna. Suatu jenis gas yang dinamakan gas sempurna (ideal) atom tunggal dengan sifat-sifat sebagai berikut:

1. Molekul-molekulnya berupa titik massa.
2. Gaya tarik-menarik antar molekul tidak ada.
3. Gas ini tidak dapat menjadi cair ataupun padat.

Gas demikian pada hakikatnya tak terdapat di alam, tetapi didekati oleh gas-gas mulia seperti Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon dan Radon.

Diandaikan sejumlah gas ideal terdapat dalam sebuah bejana berbentuk kubus.



**Gambar 2.1.** Gas ideal dalam bejana

Andaikan dalam keadaan seimbang:

$N$  = Jumlah molekul gas dalam bejana

$m_0$  = massa tiap molekul

$\rho$  = massa jenis gas

$p$  = tekanan gas

$V$  = volume gas

$T$  = suhu gas

- $a$  = rusuk kubus
- $c$  = kelajuan molekul
- $v$  =  $N/V$  = jumlah molekul per satuan volume

Kelajuan molekul ini berbeda bagi satu molekul dengan molekul lain. Oleh karena itu akan didefinisikan dua pengertian yang menyangkut kelajuan ini.

Kelajuan rata-rata molekul ( $\bar{c}$ )

$$\bar{c} = \frac{\sum c}{N} \quad (2.1)$$

Kelajuan akar kuadrat rata-rata ( $u$ )

$$u = \sqrt{\frac{\sum c^2}{N}} \quad (2.2)$$

$$\sum c^2 = Nu^2$$

Kelajuan  $c$  sebuah molekul dapat diuraikan menjadi:  $c_x$ ,  $c_y$  dan  $c_z$ . Sehingga  $c^2 = c_x^2 + c_y^2 + c_z^2$  dan  $\sum c^2 = \sum c_x^2 + \sum c_y^2 + \sum c_z^2 = Nu^2$ . Peluang molekul-molekul untuk bergerak ke arah manapun adalah sama sehingga jumlah komponen kelajuan ke arah sumbu  $X$ ,  $Y$  dan  $Z$  adalah sama. Jadi:

$$\sum c_x^2 = \sum c_y^2 = \sum c_z^2 = \frac{1}{3} Nu^2$$

Sebuah molekul dalam waktu  $dt$  menempuh jarak  $c_y dt$  pada arah sumbu  $y$  dan dalam waktu tersebut menumbuk bidang  $A$  sebanyak  $(c_y dt)/2a$  kali. Pada setiap tumbukan perubahan momentum molekul adalah  $2\mu c_y$ , yaitu dari  $\mu c_y$  menjadi  $-\mu c_y$ . Jadi perubahan momentumnya dalam waktu  $dt$  adalah

$$\frac{c_y dt}{2a} \times 2\mu c_y = \frac{\mu dt}{a} c_y^2$$

Untuk semua  $N$  molekul, perubahan momentum menjadi

$$dP = \frac{\mu dt}{a} \sum c_y^2 = \frac{\mu dt}{a} \times \frac{1}{3} Nu^2 = \frac{1}{3} \frac{N\mu u^2}{a} dt$$

Besar gaya benturan pada bidang  $A$  adalah

$$F = \frac{dP}{dt} = \frac{1}{3} \frac{N\mu u^2}{a}$$

Tekanan  $p$  pada bidang tersebut adalah

$$p = \frac{F}{A} = \frac{1}{3} \frac{N\mu u^2}{Aa} = \frac{1}{3} \frac{N\mu u^2}{V}$$



atau

$$pV = \frac{1}{3}N\mu u^2 \quad (2.3)$$

Energi kinetik molekul-molekul gas adalah  $E_k = \frac{1}{2}N\mu u^2$  sehingga

$$pV = \frac{2}{3}E_k \quad (2.4)$$

Dari Persamaan (2.4) terlihat bahwa energi kinetik gas  $E_k$  berbanding langsung dengan tekanan  $p$ , sementara itu dapat dipahami bahwa tekanan ini juga berbanding langsung dengan suhu  $T$ . Oleh karena itu, antara energi kinetik dan suhu juga ada keterkaitan. Apabila  $E_k$  hanya tergantung pada  $T$ , maka untuk  $T$  yang konstan, nilai  $E_k$  juga konstan. Sehingga persamaan di atas menjadi

$$pV = C \quad (2.5)$$

Persamaan (2.5) tidak lain adalah Hukum Boyle. *Pada suhu konstan, tekanan gas berbanding terbalik dengan volumenya.* Jika  $E_k$  berbanding langsung dengan  $T$ , maka Persamaan (2.4) menjadi:

$$pV = CT \quad (2.6)$$

Persamaan ini tidak lain adalah Hukum Gay-Lussac.

Apabila ada dua macam gas, misalnya gas 1 dan gas 2 maka berlakulah:

$$p_1V_1 = \frac{1}{3}N_1\mu_1u_1^2$$

dan

$$p_2V_2 = \frac{1}{3}N_2\mu_2u_2^2$$

Dari persamaan tersebut apabila  $p_1 = p_2, V_1 = V_2$ , dan  $T_1 = T_2$  atau berarti bahwa energi kinetik rata-rata molekul gas 1 = energi kinetik rata-rata molekul gas 2 ( $\frac{1}{2}\mu_1u_1^2 = \frac{1}{2}\mu_2u_2^2$ ), maka pastilah  $N_1 = N_2$ . Ini tak lain adalah Hukum Avogadro: *semua gas pada tekanan, volume, dan suhu yang sama mengandung jumlah molekul yang sama.*

Apabila ditinjau 1 molekul gas, maka  $N = N_A$  = bilangan avogadro =  $6,02 \times 10^{23}$  molekul/mol dan  $N_A\mu = M$  = bobot molekul gas, yaitu massa dari 1 mol gas. Persamaan-persamaan di atas menjadi

$$pv = \frac{1}{3}N_A \mu u^2 = \frac{1}{3}Mu^2 = \frac{2}{3}E_k = RT \quad (2.7)$$

Tetapan  $C$  khusus untuk 1 mol ini diganti dengan  $R$  dan disebut tetapan gas semesta (*universal gas constant*). Jadi

$$pv = RT \quad (2.8)$$

Untuk setiap gas, pada suhu  $T = 273 \text{ K}$  dan tekanan  $p = 1 \text{ atm}$ , maka volumenya adalah 22,4 L. Oleh karena itu, nilai  $R$  dari Persamaan (2.8) dapat dicari

$$R = \frac{(1 \text{ atm})(22,4 \text{ l/mol})}{273 \text{ K}} \text{ atau } R = 0,082 \text{ l atm mol}^{-1}\text{K}^{-1} \quad (2.9)$$

Dalam satuan-satuan lain

$$R = 8,314 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1} \quad \text{SI} \quad (2.10)$$

$$R = 8,314 \times 10^3 \text{ J kmol}^{-1} \text{K}^{-1} \quad \text{MKS} \quad (2.11)$$

$$R = 8,314 \times 10^7 \text{ erg mol}^{-1} \text{K}^{-1} \quad \text{CGS} \quad (2.12)$$

$$R = 2 \text{ cal mol}^{-1} \text{K}^{-1} \quad (2.13)$$

Untuk  $n$  mol gas, Persamaan (2.8) menjadi

$$pV = nRT \quad (2.14)$$

Dan untuk  $m$  kg gas,  $n = m/M_r$ , sehingga

$$pv = \frac{m}{M_r} RT \quad (2.15)$$

Persamaan (2.8) dapat ditulis menjadi

$$pv = N_A \frac{R}{N_A} T = N_A kT$$

atau

$$pv = N_A kT \quad (2.16)$$

Dengan  $k = R/N_A$  = tetapan Boltzman berlaku untuk 1 molekul gas. Karena nilai  $R$  dan  $N_A$  sudah diketahui, maka nilai  $k$  dapat dihitung dengan mudah. Hasilnya ialah:

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J molekul}^{-1}\text{K}^{-1} \quad (2.17)$$

untuk sembarang  $N$  molekul, maka Persamaan (2.16) menjadi

$$pV = NkT \quad (2.18)$$

dan hukum Avogadro dapat pula disimpulkan dari Persamaan (2.18) ini. Pada campuran bermacam gas, maka

$$\begin{aligned} pv &= NkT = (N_1 + N_2 + N_3 + \dots) kT \\ &= N_1 kT + N_2 kT + N_3 kT + \dots \end{aligned}$$

$$= p_1v + p_2v + p_3v + \dots$$

atau

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots \quad (2.19)$$

Persamaan ini tidak lain adalah hukum Dalton. *Tekanan campuran gas sama dengan jumlah tekanan parsialnya. Tekanan parsial suatu gas dalam campuran dengan gas-gas lain ialah tekanan gas itu apabila tersendiri menempati seluruh volume bejana tempat campuran gas itu.*

Molekul-molekul gas sempurna atom tunggal berbentuk titik matematis bermassa, sehingga hanya mempunyai energi kinetik translasi saja. Untuk satu mol, telah diperoleh persamaan-persamaan

$$pv = \frac{1}{3} N_A \mu u^2 = \frac{2}{3} E_k = RT$$

sehingga

$$E_k = \frac{3}{2} RT \quad (2.20)$$

Uraian sebelumnya telah menunjukkan bahwa gas ideal adalah gas yang memenuhi dengan tepat persamaan dari hukum Boyle dan hukum Gay-Lussac.

Hukum Boyle berbunyi: *Jika suhu gas yang berada dalam bejana tertutup (tidak bocor) dijaga tetap, maka tekanan gas berbanding terbalik dengan volumenya.* Secara matematis dapat dinyatakan:

$$\begin{aligned} p &\propto \frac{1}{V} \\ pV &= \text{tetap} \\ p_1V_1 &= p_2V_2 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Hukum Gay Lussac berbunyi: *Jika tekanan gas yang berada dalam bejana tertutup (tidak bocor) dijaga tetap, maka volume gas sebanding dengan suhu mutlaknya.* Secara matematis dapat dinyatakan:

$$\begin{aligned} p &\propto T \\ \frac{V}{T} &= \text{tetap} \\ \frac{V_1}{T_1} &= \frac{V_2}{T_2} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Data suhu gas lebih sering dinyatakan dalam  $t$  °C suhu mutlak gas  $T$  yang dinyatakan dalam satuan Kelvin (K) dihitung dengan persamaan

$$T = t + 273$$

Jadi persamaan Boyle-Gay Lussac

$$\frac{pV}{T} = \text{tetap}$$
$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} \quad (2.23)$$

Jika suhu mutlak  $T$  tetap, dihasilkan  $pV = \text{tetap}$ . Jika tekanan  $p$  tetap, dihasilkan  $\frac{V}{T} = \text{tetap}$ . Ini berlaku untuk percobaan gas ideal dalam bejana tertutup (tidak ada kebocoran) sehingga massa gas tetap selama percobaan. Jika massa atau mol gas diubah, misalnya kita ingin menggandakan mol gas  $n$ , dengan menjaga tekanan dan suhu tetap, ternyata dihasilkan volume  $V$  yang ganda (lipat dua) juga. Karena itu kita boleh menulis bilangan diruas kanan dengan  $nR$ , dengan  $R$  diperoleh dari percobaan, dan kita memperoleh persamaan umum berlaku untuk gas ideal, yang disebut dengan keadaan gas ideal.

$$pV = nRT$$

Pada dasarnya tidak ada gas sejati yang dapat memenuhi persamaan. Gas ideal artinya tiada gas yang benar-benar ideal. Akan tetapi gas pada tekanan yang tidak terlalu tinggi dan temperatur yang tidak terlalu rendah hampir mendekati gas ideal dalam arti sifatnya dapat dilakukan berdasarkan persamaan di atas.

Untuk keperluan perhitungan dibuatlah model tentang Gas Ideal, sebagai anggapan dasar dalam pembahasan Teori Kinetik Gas Ideal sebagai berikut:

1. Gas Ideal terdiri atas partikel (atom/molekul) yang jumlahnya amat besar.
2. Partikel-partikel tersebut tersebar merata dalam ruang yang ada.
3. Gerakan partikel acak ke semua arah.
4. Jarak antara partikel tersebut  $\gg$  ukuran partikel.
5. Tidak ada gaya interaksi antara partikel, kecuali bila partikel itu bertumbukan.
6. Tumbukannya lenting sempurna bila antar partikel maupun partikel dengan dinding dan terjadi dalam waktu amat singkat.
7. Hukum-hukum Newton tentang gerak berlaku pada gas.

### C. Hukum Ekuipartisi

Pada pembahasan ini terlebih dahulu akan diuraikan suatu pengertian yang disebut derajat kebebasan (*degrees of freedom*). Derajat kebebasan suatu benda ialah tiap kemungkinan gerakan bebas atau koordinat yang menentukan sikapnya.

Sebuah titik mempunyai tiga derajat kebebasan translasi dan tidak mempunyai derajat kebebasan rotasi, karena perputaran sebuah titik sekeliling sumbu putar melalui titik itu sendiri tidak akan mengubah kedudukan atau sikapnya. Oleh karena itu maka sebuah titik atau sebuah molekul atom tunggal hanya mempunyai 3 derajat kebebasan saja, yaitu ke arah sumbu  $X$ ,  $Y$  dan  $Z$ . Molekul atom dua dapat dianggap terdiri atas dua titik dan melalui dua titik ini selalu dapat ditarik sebuah garis lurus dan garis lurus ini selalu dapat dipakai sebagai suatu sumbu, misalnya sumbu  $X$ . Garis lurus ini dapat bertranslasi ke arah ketiga sumbu dan dapat berotasi sekeliling sumbu  $Y$  dan  $Z$ . Perputaran sekeliling sumbu  $X$  tidak mengubah kedudukan garis yang dipakai sebagai sumbu  $X$  ini. Jadi gas molekul atom dua mempunyai 3 derajat kebebasan translasi dan dua derajat kebebasan rotasi, atau mempunyai 5 derajat kebebasan. Molekul atom 3 atau lebih pada umumnya sudah berbentuk benda 3 dimensi, sehingga mempunyai 3 derajat kebebasan translasi ke arah ketiga sumbu dan tiga derajat kebebasan rotasi sekeliling ketiga sumbu, sehingga jumlahnya 6. Apabila derajat kebebasan itu diberi lambang  $q$ , maka

$q = 3$	untuk molekul atom 1
$q = 5$	untuk molekul atom 2
$q = 6$	untuk molekul atom 3 atau lebih

Hukum ekuipartisi mengatakan bahwa tiap derajat kebebasan memperoleh bagian energi yang sama. Telah diketahui bahwa untuk molekul atom satu energi kinetiknya  $\frac{3}{2} RT$  tiap mol dan ini mempunyai 3 derajat kebebasan. Jadi tiap derajat kebebasan memperoleh energi sebesar  $\frac{1}{2} RT$ . Oleh karena itu secara umum suatu gas yang derajat kebebasannya  $q$  mempunyai energi tiap mol sebesar

$$E_k = \frac{q}{2} RT \quad (2.24)$$

dan energi kinetik tiap molekul sebesar

$$e_k = \frac{q}{2} kT \quad (2.25)$$

Nilai tetapan Boltzmann  $k$  juga dapat dinyatakan sebagai  $k = 8,63 \times 10^{-5}$  molekul<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>.

#### D. Kapasitas Kalor Jenis

Ada dua macam kapasitas kalor jenis, yaitu kapasitas kalor jenis untuk tiap satuan massa (kg) dan kapasitas kalor jenis untuk tiap mol. *Kapasitas kalor jenis per kg suatu zat adalah jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 kg zat itu dengan 1 K. Sedangkan kapasitas kalor jenis per mol suatu zat ialah jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 mol zat itu dengan 1 K.* Selanjutnya untuk gas masing-masing kapasitas kalor jenis dibagi menjadi 2 bagian, yaitu kapasitas kalor jenis pada volume tetap  $c_v$  dan kapasitas kalor jenis pada tekanan tetap  $c_p$ .

Apabila  $n$  mol gas dipanaskan dari suhu  $T$  menjadi  $T+dT$  pada volume konstan, maka kalor yang diperlukan adalah

$$dQ_v = nc_v dT \quad (2.26)$$

karena suhu naik, maka energi kinetik juga naik, sebesar

$$dE_k = d\left(n\frac{q}{2}RT\right) = n\frac{q}{2}RdT \quad (2.27)$$

Jadi kalor yang ditambahkan itu digunakan untuk menaikkan energi kinetik, sehingga dari kedua persamaan ini diperoleh

$$c_v = \frac{q}{2}R \quad (2.28)$$

Apabila dipanaskan pada tekanan konstan, maka volume dan suhunya naik. Ini berarti bahwa kecuali ada kenaikan energi kinetik juga usaha yang dilakukan oleh gas itu. Bila perubahan volumenya  $dV$ , maka besar usaha itu adalah  $p dV$ . Jadi kalor yang diberikan sebesar  $dQ_p = nc_p dT$  digunakan untuk menaikkan energi kinetik sebesar  $n\frac{q}{2}RdT$  dan untuk melakukan usaha sebesar  $p dV$ , sehingga

$$nc_p dT = n\frac{q}{2}RdT + p dV$$

Bila ruas kiri dan kanan dibagi dengan  $n$ ,  $V$  harus diganti dengan  $v$ . Maka persamaan terakhir menjadi

$$(c_p - c_v)dT = pdv \text{ atau } c_p - c_v = p \frac{dv}{dT}$$

Dari persamaan  $pv = RT$  untuk  $p$  konstan maka  $p \frac{dv}{dT} = R$ , sehingga persamaan terakhir menjadi

$$c_p - c_v = R \quad (2.29)$$

Persamaan (2.29) dapat diubah menjadi

$$c_p = R + c_v = R\left(1 + \frac{q}{2}\right)$$

atau

$$c_p = \left(1 + \frac{q}{2}\right)R$$

Bila didefinisikan tetapan Laplace sebagai

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (2.30)$$

maka  $\gamma = \left(1 + \frac{q}{2}\right)R : \frac{q}{2}R = 1 + \frac{2}{q}$ . Jadi

$$\gamma = 1 + \frac{2}{q} \quad (2.31)$$

## E. Kelajuan Molekul

Untuk 1 mol gas sempurna berlaku persamaan-persamaan

$$pv = \frac{1}{3} N_A \mu u^2 = \frac{1}{3} Mu^2 = RT$$

Dari persamaan ini dapat disimpulkan bahwa kelajuan akar kuadrat rata-rata molekul adalah

$$u = \sqrt{\frac{3pv}{M}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (2.32)$$

Dari persamaan ini  $M/v$  adalah massa jenis atau rapat  $\rho$ , sehingga dapat pula diperoleh

$$u = \sqrt{\frac{3p}{\rho}} \quad (2.33)$$

Persamaan (2.32) dan (2.33) menunjukkan bahwa kelajuan akar kuadrat rata-rata molekul-molekul gas adalah berbanding terbalik dengan akar bobot molekul atau rapatnya. Oleh karena itu maka untuk dua macam gas berlaku

$$\frac{u_1}{u_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \quad (2.34)$$

Hal ini sesuai dengan hukum Graham tentang difusi gas. *Kelajuan difusi suatu gas berbanding terbalik dengan akar bobot molekul atau rapatnya; atau waktu untuk difusi gas berbanding langsung dengan akar bobot molekul atau rapatnya.*

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{u_2}{u_1} = \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad (2.35)$$

Kelajuan molekul-molekul gas walaupun gas itu sejenis adalah tidak sama. Dapat dipahami bahwa jumlah molekul  $dN$  yang kelajuannya terletak antara  $c$  dan  $c + dc$  adalah berbanding langsung dengan interval  $dc$  dan dengan banyaknya molekul  $N$  serta juga tergantung pada besar  $c$ , dan ini berarti berbanding langsung dengan suatu fungsi  $\rho(c)$ . Karena itu,

$$dN = N\varphi(c)dc$$

Menurut Maxwell

$$\varphi(c) = 4\pi \left(\frac{M}{2\pi RT}\right)^{3/2} \cdot c^2 \cdot e^{-\frac{Mc^2}{2RT}} = \frac{1}{N} \frac{dN}{dc} \quad (2.36)$$

Persamaan (2.36) disebut sebagai persamaan distribusi Maxwell.

Kelajuan rata-rata  $\bar{c}$  dapat dihitung dari definisi

$$\bar{c} = \frac{\sum c}{N} = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} c \, dN \quad (2.37)$$

Persamaan (2.36) dapat diubah menjadi:

$$\varphi(c) = Ac^2 e^{-Bc^2} = \frac{1}{N} \frac{dN}{dc}$$

dengan

$$A = 4\pi \left(\frac{M}{2\pi RT}\right)^{3/2} \quad \text{dan} \quad B = \frac{M}{2RT}$$

Selanjutnya dapat pula ditulis  $dN = NAc^2 e^{-Bc^2} dc$  dan sesuai dengan Persamaan (2.37), maka

$$\bar{c} = A \int_0^{\infty} c^3 e^{-Bc^2} dc \quad (2.38)$$

Integral dari Persamaan (2.38) mempunyai bentuk

$$f(n) = \int_0^{\infty} x^n e^{-ax^2} dx$$

Yang menurut matematika mempunyai penyelesaian sebagai berikut:



Untuk $n = 1$ ,	$f(n) = \frac{1}{2a}$
Untuk $n = 2$ ,	$f(n) = \frac{1}{4}\sqrt{\pi/a^3}$
Untuk $n = 3$ ,	$f(n) = 1/2a^2$
Untuk $n = 4$ ,	$f(n) = \frac{3}{8}\sqrt{\pi/a^5}$

Jelaslah bahwa Persamaan (2.38) bersesuaian dengan nilai  $n = 3$ , sehingga hasilnya adalah:

$$\bar{c} = \frac{A}{2B^2} = \frac{4\pi \left(\frac{M}{2\pi RT}\right)^{3/2}}{2 \left(\frac{M}{2RT}\right)^2}$$

Jadi kelajuan rata-rata molekul

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (2.39)$$

Disamping dua macam kelajuan seperti yang sudah dibahas, yaitu kelajuan akar kuadrat rata-rata  $u$  dan kelajuan rata-rata  $\bar{c}$ , masih ada satu macam kelajuan lagi yaitu *kelajuan paling mungkin*,  $c_m$ . *Kelajuan paling mungkin molekul-molekul  $c_m$  adalah kelajuan molekul itu yang bersangkutan dengan nilai  $\varphi(c)$  maksimum.* Untuk memperoleh nilai  $c_m$ , maka fungsi  $\varphi(c)$  ini didiferensialkan terhadap  $c$  kemudian disamakan dengan nol. Hasilnya adalah

$$c_m = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \quad (2.40)$$

Apabila ketiga macam kelajuan ini dibandingkan dan faktor yang sama dihilangkan, maka akan diperoleh:

$$u : \bar{c} : c_m = 1 : 0,921 : 0,817 \quad (2.41)$$

Apabila kelajuan molekul-molekul gas ini dibandingkan dengan kelajuan bunyi di dalam gas, maka tingkat besarnya adalah sama. Misalkan kelajuan bunyi itu  $w$  dan kita bandingkan dengan besar  $u$ .

$$w = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\gamma \frac{pv}{\rho v}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad (2.42)$$

$$w : u = \sqrt{\gamma} : \sqrt{3} \quad (2.43)$$

## F. Jalan Bebas Rata-rata Molekul

Jalan bebas rata-rata (*mean free path*) molekul didefinisikan sebagai jarak rata-rata antara dua benturan yang beraturan atau jarak rata-rata molekul berjalan di antara dua tumbukan yang berurutan. Sebuah molekul dengan garis tengah  $d$  hanya dapat membentur molekul-molekul lain yang berada dalam silinder berliku-liku, yang sumbunya adalah lintasan molekul itu dan diameternya  $2d$ . Jadi jari-jari silinder itu adalah  $d$  ( $2r$ ) yang juga disebut sebagai jari-jari eksklusi (*exclusion radius*).

Bila panjang jalan yang ditempuh dalam waktu  $t$  detik  $s = \bar{c} t$ , maka volume silinder yang bersangkutan adalah  $\pi d^2 s$  dan jumlah molekul yang dikandungnya adalah  $v\pi d^2 s$  dan ini sama dengan jumlah benturan sepanjang jalan  $s$  itu. Jalan bebas rata-rata sama dengan panjang jalan dibagi jumlah benturan, yaitu  $s/(v\pi d^2 s)$ . Jika jalan bebas rata-rata ini diberi lambang  $\lambda$ , maka:

$$\lambda = \frac{1}{v\pi d^2} \quad (2.44)$$

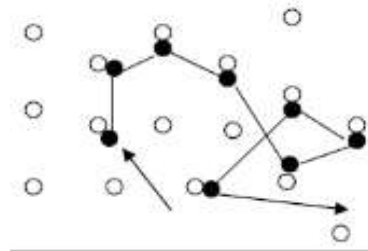
Persamaan ini memerlukan koreksi, karena molekul-molekul lain dalam silinder itu tidak diam, tetapi juga bergerak. Menurut Maxwell, sesuai dengan hukum distribusi kelajuan, maka jumlah tumbukan adalah  $\sqrt{2}$  kali lebih besar, sehingga jalan bebas rata-ratanya

menjadi  $\sqrt{2}$  kali lebih kecil. Kalau sekarang jalan bebas rata-rata setelah dikoreksi diberi lambang  $l$ , maka

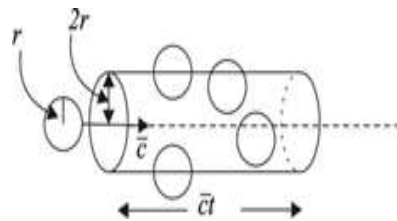
$$l = \frac{1}{\sqrt{2}v\pi d^2} = \frac{0,707}{v\pi d^2} \quad (2.45)$$

$\pi d^2$  disebutampang lintang benturan mikroskopik (*microscopic collision cross section*) dan dinyatakan dengan lambang  $\sigma$ . Jadi Persamaan (2.45) menjadi

$$l = \frac{0,707}{v\sigma} \quad (2.46)$$



Gambar 2.2. Ilustrasi jalan bebas molekul

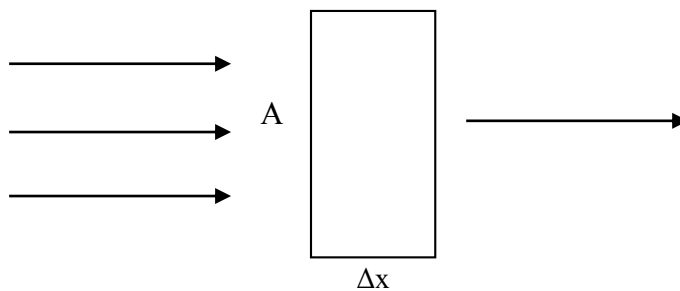


Gambar 2.3. Ilustrasi molekul dalam silinder

Sementara itu hasil kali jumlah molekul per satuan volume  $v$  dengan tampang lintasan benturan mikroskopik  $v\sigma$  disebut tampang lintasan benturan makroskopik (*macroscopic collision cross section*).

Diameter pembagi molekul gas kira-kira  $2 \times 10^{-10}$  m, dan pada suhu  $0^\circ\text{C}$ , tekanan 1 atm, maka volume 1 mol gas ( $6,02 \times 10^{23}$  molekul) adalah  $22,4 \times 10^{-3} \text{m}^3$ , sehingga  $v = 2,7 \times 10^{25}$  molekul per  $\text{m}^3$ . Dengan demikian makan jalan bebas rata-rata  $l = 2 \times 10^{-7} \text{m}$ .

Selanjutnya diandaikan adanya suatu lapisan molekul-molekul gas dengan luas permukaan  $A$  dan tebal lapisan  $\Delta x$  seperti pada Gambar 2.4 bila dilihat dari samping. Molekul-molekul gas dalam lapisan ini merupakan sasaran bagi berkas molekul yang melewatinya.



**Gambar 2.4.** Lapisan molekul-molekul gas sebagai sasaran bagi berkas molekul yang melewatinya

Sejumlah molekul dapat melewatinya dari kiri ke kanan, namun sejumlah molekul yang lain akan membentur molekul-molekul sasaran. Perbandingan dari jumlah benturan  $\Delta N$ , dengan jumlah total molekul dalam berkas,  $N$ , adalah sama dengan perbandingan dari luas yang ditempati oleh molekul-molekul sasaran dengan luas total lapisan. Jadi

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\text{luas sasaran}}{\text{luas total}}$$

Bila diameter molekul sasaran adalah  $d$ , maka luas sasaran per molekul adalah

$$\sigma = \pi d^2 \quad (2.47)$$

Luasan  $\sigma$  disebut *tampang lintang benturan mikroskopik*. Luas sasaran total sama dengan hasil kali luas ini dengan jumlah molekul sasaran dalam lapisan. Bila terdapat  $v$  molekul sasaran per satuan volume, maka jumlah molekul total adalah  $vA x$ , sehingga

luas sasaran total sama dengan  $v\sigma A x$ . sementara itu luas total lapisan adalah  $A$ , sehingga

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{v\sigma A \Delta x}{A} = v\sigma \Delta x \quad (2.48)$$

Juga seperti apa yang sudah dibicarakan sebelumnya, maka  $v\sigma$  disebut *tampang lintang benturan makroskopik* untuk molekul-molekul yang setara.

Tiap molekul dalam berkas yang membentur molekul sasaran akan mengalami penyimpangan dari arah semula dan dikatakan mengalami hamburan, sehingga menyebabkan pengurangan jumlah molekul yang masih dalam berkas. Oleh karena itu, dapatlah ditafsirkan bahwa  $\Delta N$  bukan sebagai jumlah tumbukan, tetapi sebagai penurunan dalam jumlah  $N$ , sehingga

$$\Delta N = -Nv\sigma \Delta x$$

atau

$$\frac{\Delta N}{N} = -v\sigma \Delta x \quad (2.49)$$

bila  $N$  sangat besar maka Persamaan (2.49) dapat ditulis menjadi:

$$\frac{dN}{N} = -v\sigma dx \quad (2.50)$$

Apabila jumlah molekul berkas sebelum masuk ke dalam lapisan dan setelah keluar dari lapisan  $N$ , maka

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -v\sigma \int_0^x dx$$

Bentuk integral ini akan memberikan hasil

$$N = N_0 e^{-v\sigma x} \quad (2.51)$$

Persamaan (2.51) disebut *survival equation*. Persamaan ini menunjukkan jumlah molekul  $N$  dari jumlah awal molekul  $N_0$  yang belum mengalami benturan setelah bergerak sejauh  $x$ .

Dari Persamaan (2.49) dan (2.51) dapat diperoleh,

$$\Delta N = N_0 v e^{-v\sigma x} \Delta x \quad (2.52)$$

Dalam persamaan ini,  $\Delta N$  adalah jumlah molekul yang mengalami benturan setelah menempuh jarak antara  $x$  dan  $x + \Delta x$ .

Perhitungan jarak rata-rata yang ditempuh oleh  $N_0$  molekul sebelum mengalami benturan pertama. Jarak rata-rata ini dikenal sebagai jalan bebas rata-rata,  $\lambda$ . Untuk

menghitungnya, maka jarak  $x$  dikalikan dengan jumlah partikel  $\Delta N$  yang menempuh jarak  $x$  sebelum benturan, lalu dijumlahkan melalui seluruh nilai  $x$  dan dibagi dengan jumlah total  $N_0$ . Jadi

$$\lambda = \frac{\sum x \Delta N}{N_0} = v\sigma \int_0^{\infty} x e^{-v\sigma x} dx$$

dan ini akan menghasilkan

$$\lambda = \frac{1}{v\sigma} \quad (2.53)$$

Persamaan (2.53) sesuai dengan Persamaan (2.44). Oleh karena itu, maka jalan bebas rata-rata bagi berkas molekul yang melalui lapisan molekul-molekul gas adalah sama dengan jalan bebas rata-rata bagi molekul-molekul gas yang bergerak secara acak diantara molekul-molekul lain. Ada satu hal yang perlu diperhatikan yaitu bahwa jalan bebas rata-rata ini tidak tergantung pada kelajuan molekul.

## G. Gas Nyata

Sifat-sifat gas nyata berbeda dengan sifat-sifat gas sempurna. Molekul-molekul gas sempurna tidak tarik-menarik dan tidak mempunyai volume. Molekul-molekul gas nyata tarik-menarik dan mempunyai volume. Oleh karena itu tidak seluruh volume bejana bebas bagi gerakan molekul-molekul gas nyata, sebab molekul-molekul itu sendiri sudah memakan tempat. Dengan demikian maka perlu adanya koreksi untuk volume. Koreksi ini adalah volume efektif molekul-molekul dan disebut kovolume, yang biasa diberi lambang  $b$ , jadi volume  $v$  harus diganti dengan  $v - b$ , sehingga persamaan berubah menjadi

$$p(v - b) = RT \text{ atau } p = \frac{RT}{v - b} \quad (2.54)$$

Tekanan yang dialami oleh dinding bejana disebabkan oleh benturan molekul-molekul gas. Tekanan ini lebih kecil dari  $p$ , karena molekul-molekul yang membentur itu tertarik ke arah dalam cairan suku koreksi ini berbanding langsung dengan jumlah molekul yang tertarik (membentur) dan dengan jumlah molekul yang menarik. Jadi berbanding langsung dengan kuadrat rapatnya ( $\rho^2$ ) atau berbanding terbalik dengan kuadrat volume jenisnya ( $1/v^2$ ). Oleh karena itu Persamaan (2.63) di atas di tulis menjadi

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}$$

atau

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (2.55)$$

Persamaan tersebut disebut persamaan Van der Waals. Besaran  $a$  dan  $b$  disebut tetapan Van der Waals, yang nilainya berbeda untuk zat yang berbeda. Oleh karena itu sering disebut sebagai tetapan gas individual (*individual gas constant*). Pada persamaan tersebut berlaku untuk 1 mol gas nyata. Bila ada  $n$  mol gas, maka koreksi untuk tekanan, yang sering disebut tekanan kohesi  $p_k$  menjadi  $\frac{n^2 a}{v^2}$  dan kovolume molekul-molekul menjadi  $nb$  dengan demikian persamaan Van der Waals menjadi

$$\left(p + \frac{n^2 a}{v^2}\right)(V - nb) = nRT \quad (2.56)$$

## H. Contoh Soal



Contoh

2.1

Lima buah partikel masing-masing dengan kecepatan:  $\vec{c}_1 = 5\hat{i}$ ;  $\vec{c}_2 = 4\hat{i} + 3\hat{j}$ ;  $\vec{c}_3 = 3\hat{i} - 4\hat{j}$ ;  $\vec{c}_4 = 2\hat{i} + 2\hat{j} + \hat{k}$  dan  $\vec{c}_5 = -6\hat{k}$ . (a) Hitunglah kelajuan rata-rata dan (b) kelajuan akar kuadrat rata-rata partikel.

Catatan: Istilah kecepatan (*velocity*) untuk menyatakan besaran vektor, sedang kelajuan (*speed*) untuk menyatakan besaran skalar.

### Penyelesaian

Diketahui:  $\vec{c}_1 = 5\hat{i}$ ;  $\vec{c}_2 = 4\hat{i} + 3\hat{j}$ ;  $\vec{c}_3 = 3\hat{i} - 4\hat{j}$ ;  $\vec{c}_4 = 2\hat{i} + 2\hat{j} + \hat{k}$  dan  $\vec{c}_5 = -6\hat{k}$

Ditanya: (a) Hitunglah kelajuan rata-rata

(b) Kelajuan akar kuadrat rata-rata partikel



*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

$$(a) \ c_1 = 5; \ c_2 = \sqrt{(4)^2 + (3)^2} = 5; \ c_3 = \sqrt{(3)^2 + (-4)^2} = 5$$

$$c_4 = \sqrt{(2)^2 + (2)^2 + (1)^2} = 5 \text{ dan } c_5 = \sqrt{(-6)^2} = 6.$$

(b) Kelajuan akar kuadrat rata-rata partikel:

$$u = \sqrt{\frac{25 + 25 + 25 + 9 + 36}{5}} = 4,9$$

Periksa  
Kembali



Contoh

2.2

Hitunglah rapat atau massa jenis dan kelajuan akar kuadrat rata-rata untuk molekul He pada suhu  $0^\circ\text{C}$  dan tekanan 1 atm, jika diketahui bahwa massa atom relatif He = 4,00260 u.



### Penyelesaian

*Diketahui:* He = 4,00260 u

*Ditanya:* rapat atau massa jenis dan kelajuan

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*  $\rho = \frac{M_{He}}{v}$  dan  $u = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}$

Pada suhu 0°C dan tekanan 1 atm, maka volume 1 mol semua gas sama dengan 22,4 liter =  $22,4 \times 10^{-3} \text{m}^3$ . Jadi  $v = 22,4 \times 10^{-3} \text{m}^3 \text{mol}^{-1}$ .

Dengan demikian maka rapat gas He

$$\rho = \frac{M_{He}}{v} = \frac{4,00260 \times 10^{-3} \text{kgmol}^{-1}}{22,4 \times 10^{-3} \text{m}^3 \text{mol}^{-1}} = 0,1787 \text{ kg/m}^3$$

Kelajuan akar kuadrat rata-rata

$$u = \sqrt{\frac{3p}{\rho}} = \sqrt{\frac{3 \times 1,01325 \times 10^5 \text{Pa}}{0,1787 \text{ kgmol}^{-1}}} = 1304,24 \text{ m/s}$$

Periksa  
Kembali







Sejumlah gas neon yang suhunya  $455^{\circ}\text{C}$  dan tekanannya  $1\text{ atm}$  dicampur dengan sejumlah gas argon yang suhunya  $0^{\circ}\text{C}$  dan tekanannya juga  $1\text{ atm}$ . Jika volume gas neon 2 kali volume gas argon, (a) hitunglah perbandingan jumlah mol kedua gas itu dan (b) hitunglah suhu air, (c) Jika bobot molekul neon  $20,179$  dan bobot molekul argon  $39,948$ , berapakah massa 1 molekul neon dan argon? (d) berapakah kelajuan akar kuadrat rata-rata kedua molekul itu?

### Penyelesaian

*Diketahui:*  $T_1 = 455^{\circ}\text{C}$  dan  $T_2 = 0^{\circ}\text{C}$

*Ditanya:* (a) hitunglah perbandingan jumlah mol kedua gas itu

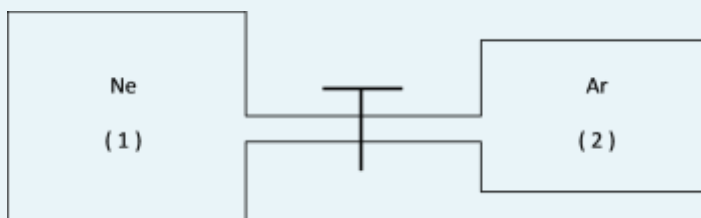
(b) hitunglah suhu air

(c) Jika bobot molekul neon  $20,179$  dan bobot molekul argon  $39,948$ , berapakah massa 1 molekul neon dan argon?

(d) berapakah kelajuan akar kuadrat rata-rata kedua molekul itu?

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*  $p_1V_1 = n_1RT_1$  dan  $p_2V_2 = n_2RT_2$



$$p_1 = 1\text{ atm}$$

$$T_1 = 455^{\circ}\text{C} = 728\text{ K}$$

$$V_1 = 2 V_2$$

$$M_{\text{Ne}} = 20,179$$

$$p_2 = 1\text{ atm}$$

$$T_2 = 0^{\circ}\text{C} = 273\text{ K}$$

$$V_2 = V_2$$

$$M_{\text{Ar}} = 39,948$$



(a)  $p_1V_1 = n_1RT_1$  dan  $p_2V_2 = n_2RT_2$

Jika persamaan pertama dibagi dengan persamaan kedua dengan mengingat data di atas, maka perbandingan jumlah mol kedua gas adalah

$$n_1:n_2 = 3:4$$

- (b) Karena suhu kedua gas itu tidak sama, maka pada proses pencampuran itu terjadi aliran kalor dari gas yang suhunya tinggi ke gas yang suhunya lebih rendah. Jika dimisalkan suhu air  $T$ , karena tekanannya konstan maka

$$n_1c_{p1}(728 - T) = n_2c_{p2}(T - 273)$$

Baik Ne maupun Ar adalah molekul atom tunggal sehingga  $c_p$  kedua gas ini sama. Karena itu pada persamaan tersebut, keduanya sudah saling menyalakan. Sementara itu perbandingan  $n_1$  dan  $n_2$  sudah diketahui, sehingga dengan mudah suhu akhir  $T$  dapat dihitung. Hasilnya adalah

$$T = 468 \text{ K} = 195 \text{ }^\circ\text{C}$$

- (c) Massa tiap molekul

$$\begin{aligned}\mu_{Ne} &= \frac{M}{N_A} = \frac{20,179 \text{ kgkmol}^{-1}}{6,02 \times 10^{26} \text{ molekulkmol}^{-1}} \\ &= 3,35 \times 10^{-26} \text{ kg/molekul}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{Ar} &= \frac{M}{N_A} = \frac{39,948 \text{ kgkmol}^{-1}}{6,02 \times 10^{26} \text{ molekulkmol}^{-1}} \\ &= 6,64 \times 10^{-26} \text{ kg/molekul}\end{aligned}$$

- (d) Kelajuan akar kuadrat rata-rata molekul  $u = \sqrt{\frac{3kT}{\mu}}$ , jadi

$$u_{Ne} = \sqrt{\frac{3(1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1} \text{ molekul}^{-1})(468 \text{ K})}{3,35 \times 10^{-26} \text{ kgmolekul}^{-1}}} = 760 \text{ m/s}$$

$$u_{Ar} = \sqrt{\frac{3(1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1} \text{ molekul}^{-1})(468 \text{ K})}{6,64 \times 10^{-26} \text{ kgmolekul}^{-1}}} = 760 \text{ m/s}$$



Catatan: molekul sebenarnya bukan satuan. Berbeda dengan mol yang merupakan lambang internasional untuk satuan mole. Pada perhitungan di atas molekul ikut dilibatkan agar pengertiannya lebih jelas. Jadi sebenarnya satuan untuk tetapan Boltzman  $k$  adalah  $\text{JK}^{-1}$ . Tetapi karena tetapan ini berlaku untuk 1 molekul, maka untuk menegaskan sebagai satuan telah ditulis  $\text{J molekul K}^{-1}$ .

Periksa  
Kembali



## 1. Soal Latihan



Latihan

1

Hitunglah tetapan Loschmidt,  $N_L$ , yaitu jumlah molekul gas sempurna tiap  $\text{cm}^3$  pada keadaan standar ( $0^\circ\text{C}$  dan 1 atm).

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



- (a) Berapakah rapat (massa jenis) gas oksigen pada suhu dan tekanan standard?
- (b) Berapakah massa molekul gas ini? Anggaphlah gas oksigen sebagai gas sempurna dengan massa atom relatif 15,9984.

**Penyelesaian**

*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Sebuah bola dengan massa 2 mg bergerak bolak-balik antara dua dinding sejajar yang berjarak 10 cm. Kelajuan bola sebesar  $2 \times 10^3 \text{ cm/s}$  dan benturannya dengan kedua dinding tersebut adalah lenting sempurna. Berapakah besar gaya rata-rata yang diperlukan untuk menahan dinding agar tidak bergerak oleh benturan, bila diameter bola diabaikan?

## Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Jika kelajuan 10 molekul pada suatu saat berturut-turut adalah 1, 2, 3, ..., 10 m/s. (a) Hitunglah kelajuan akar kuadrat rata-rata,  $u$ . (b) Hitunglah kelajuan rata-ratanya,  $\bar{c}$ . (c) Apabila massa tiap molekul  $\mu$ , berapakah energi kinetik rata-ratanya?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Rapat massa hydrogen pada  $0^{\circ}\text{C}$  dan 1 atm adalah  $1,25 \text{ kg/m}^3$ . (a) Hitunglah kelajuan rata-rata molekul nitrogen pada keadaan ini. (b) Hitunglah tetapan Boltzman  $k$  dengan menggunakan nilai bilangan Avogadro  $N_A$  dan bobot molekul nitrogen. (c) Nitrogen alam hakikatnya terdiri atas dua isotop dengan perbandingan dua massa atomnya 14,008:15,005; sedang perbandingan cadangannya adalah 99,63% : 0,37%. Jika hal ini diperhitungkan apakah berpengaruh terhadap hasil perhitungan.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali





Sebuah molekul gas tertentu di permukaan bumi memiliki laju *rms* untuk gas tersebut pada tepat  $0^{\circ}\text{C}$ . Jika gas tersebut bergerak lurus ke atas tanpa menabrak molekul-molekul lain, seberapa tinggi gas akan naik?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Terdapat sekitar satu atom hidrogen per  $\text{cm}^3$  di ruang angkasa, dimana temperatur (di tempat teduh) adalah sekitar 3,5 K. Tentukan laju *rms* atom-atom ini dan tekanan yang mereka berikan.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali

## J. Tugas



Tugas

1

Pada  $0^{\circ}\text{C}$ , hitunglah kelajuan akar kuadrat rata-rata,  $u$ , kelajuan rata-rata,  $\bar{c}$ , dan kelajuan paling mungkin,  $c_m$ , untuk gas hidrogen, nitrogen dan oksigen. Diketahui bobot atom untuk ketiga gas itu berturut-turut adalah 1,0079 ; 14,0067 dan 15,9994.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Bagaimanakah jalan bebas rata-rata molekul,  $l$ , jumlah benturan oleh satu molekul per detik,  $z_1$ , dan jumlah benturan oleh semua molekul per satuan volume per detik,  $z$ , tergantung pada tekanan  $p$ ?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Massa molekul hidrogen  $3,3 \times 10^{-24}$  g. Bila  $10^{23}$  molekul hidrogen ini tiap detik membentur dinding seluas  $2 \text{ cm}^2$  dengan sudut  $45^\circ$  terhadap normal dengan kelajuan  $10^5 \text{ cm s}^{-1}$ , berapakah tekanan yang ditimbulkannya pada tembok?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



(a) Tentukanlah nilai rata-rata energi kinetik suatu partikel gas ideal pada  $0,0^{\circ}\text{C}$  dan  $100^{\circ}\text{C}$ . (b) Berapakah energi kinetik satu mol gas ideal ini pada kedua suhu itu?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Suatu kelompok molekul-molekul Suatu berkas molekul masing-masing dengan ruji  $2 \times 10^{-10}$  m membentur suatu gas yang tersusun dari molekul-molekul dengan ruji  $3 \times 10^{-10}$  m. Tiap  $\text{m}^3$  terdapat  $10^{24}$  molekul gas. Tentukanlah (a) ruji eksklusi, (b) tampang lintang benturan mikroskopik, (c) tampang lintang benturan makroskopik, (d) bagian dari berkas yang tersisa dalam berkas setelah bergerak dalam gas sejauh  $10^{-6}$  m, (f) jarak yang ditempuh berkas dalam gas sebelum separuh dari molekul-molekulnya dihamburkan, (g) jalan bebas rata-rata berkas dalam gas.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



### A. Persamaan Keadaan

Persamaan keadaan suatu sistem ialah hubungan antara variabel-variabel keadaan atau koordinat termodinamika sistem itu pada suatu keadaan seimbang. Keadaan setimbang suatu sistem yang terdiri atas sejumlah gas, ditentukan oleh tekanannya ( $p$ ), volumenya ( $v$ ), suhunya ( $T$ ), dan massanya ( $m$ ). Besaran-besaran seperti inilah yang disebut variabel keadaan atau koordinat termodinamik. Jadi persamaan keadaan sistem ini secara umum adalah:

$$f(p, V, T, m) = 0 \quad (3.1)$$

Jika yang diketahui bukan jumlah massanya melainkan jumlah molnya ( $n$ ), maka persamaan keadaan itu secara umum adalah:

$$f(p, V, T, n) = 0 \quad (3.2)$$

Untuk satu mol gas persamaan keadaannya menjadi

$$f(p, v, T) = 0 \quad (3.3)$$

### B. Persamaan Keadaan Gas Sempurna

Persamaan keadaan gas sempurna seperti yang sudah diketahui sebelumnya yaitu:

Untuk satu mol

$$pv = RT \quad (3.4a)$$

Untuk  $n$  mol

$$pV = nRT \quad (3.4b)$$

Untuk  $m$  kg

$$pV = \frac{m}{M_r} RT \quad (3.4c)$$

dengan:

$M_r$  = massa relatif molekul = massa tiap 1 mol gas

$R$  = tetapan gas umum untuk 1 mol

dengan:  $R = 0,082 \text{ l atm mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$$R = 8,3143 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (\text{SI})$$

$$R = 8,3143 \times 10^3 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (\text{MKS})$$

$$R = 8,3143 \times 10^7 \text{ erg mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad (\text{CGS})$$

$$R = 2 \text{ kal mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

### C. Persamaan Keadaan Gas Nyata

Tahun 1873 Vander Waals, seorang fisikawan bangsa Belanda menjabarkan persamaan berikut, untuk melukiskan keadaan gas nyata.

$$\left[ p + \frac{a}{v^2} \right] (v - b) = RT \quad (3.5a)$$

$$\left[ p + \frac{n^2 a}{v^2} \right] (V - nb) = nR \quad (3.5b)$$

Persamaan (3.5a) berlaku untuk 1 mol gas dan Persamaan (3.5b) untuk  $n$  mol gas. Sementara  $a$  dan  $b$  adalah tetapan, yang disebut *tetapan Van der Waals*, tetap ini lainnya berbeda untuk gas yang berbeda, sehingga sering pula disebut sebagai tetapan gas individual (*individual gas constant*). Pada Tabel 3.1 diperlihatkan nilai kedua tetapan ini untuk beberapa macam gas.

Jika volume gas besar sekali, maka  $a/v^2$  dan  $b$  dalam kedua persamaan di atas dapat diabaikan, sehingga persamaan kembali menjadi persamaan keadaan untuk gas sempurna.

Persamaan bentuk lain ialah yang disebut persamaan virial.

$$pv = A + \frac{B}{v} + \frac{C}{v^2} + \dots \quad (3.6)$$

$A, B, C, \dots$  adalah fungsi suhu dan disebut koefisienvirial. Untuk gas sempurna  $A = RT$  dan  $B = C = D = \dots = 0$ . Persamaan Van der Waals pun dapat ditulis dalam bentuk virial. Persamaan (3.5a) dapat diubah menjadi

$$pv = RT \left( 1 - \frac{b}{v} \right)^{-1} - \frac{a}{v}$$

Hal ini diperoleh dari:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$$

$$pv - pb + \frac{av}{v^2} - \frac{ab}{v^2} = RT$$

$$pv\left(1 - \frac{b}{v}\right) + \frac{a}{v}\left(1 - \frac{b}{v}\right) = RT$$

$$\left(1 - \frac{b}{v}\right)\left(pv + \frac{a}{v}\right) = RT$$

$$pv + \frac{a}{v} = RT\left(1 - \frac{b}{v}\right)^{-1}$$

$$pv = RT\left(1 - \frac{b}{v}\right)^{-1} - \frac{a}{v}$$

Dengan rumus binomial

$$\left[1 - \frac{b}{v}\right]^{-1} = 1 + \frac{b}{v} + \frac{b^2}{v^2} + \dots$$

Jadi dalam bentuk virial persamaan Van der Waals menjadi

$$pv = RT + \frac{RTb - a}{v} + \frac{RTb^2}{v^2} + \dots$$

Dalam hal ini maka:  $A = RT$ ;  $B = RTb - a$ ;  $C = RTb^2$  dan seterusnya.

Persamaan Beattie-Bridgeman sangat cocok dengan hasil eksperimen untuk kawasan  $p$ ,  $v$ , dan  $T$  yang luas. Persamaan ini adalah modifikasi dari persamaan virial.

$$p = \frac{RT(1-\epsilon)}{v^2}(v + B) - \frac{A}{v^2} \quad (3.7)$$

$$A = A_o \left(1 - \frac{a}{v}\right) \quad (3.8)$$

$$B = B_o \left(1 - \frac{b}{v}\right) \quad (3.9)$$

$$\epsilon = \frac{C}{vT^3} \quad (3.10)$$

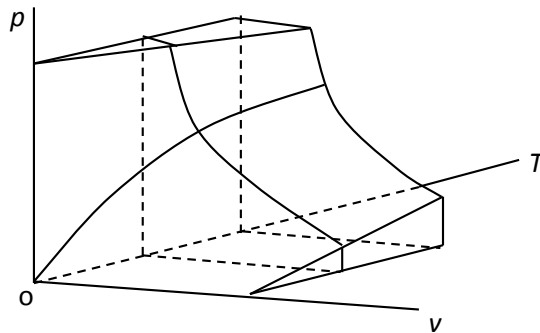
$A_o$ ,  $a$ ,  $B_o$ ,  $b$ , dan  $C$  adalah tetapan yang berbeda nilainya untuk gas yang berbeda.

**Tabel 3.1.** Tetapan  $a$  dan  $b$  dalam Persamaan Van der Waals untuk beberapa macam gas

Zat	$a$ (J.m <sup>3</sup> .K mol <sup>-2</sup> )	$b$ (m <sup>3</sup> .K mol <sup>-1</sup> )
He	$3,44 \times 10^3$	0,0234
H <sub>2</sub>	24,80	0,0266
O <sub>2</sub>	138,00	0,0318
CO <sub>2</sub>	366,00	0,0429
H <sub>2</sub> O	580,00	0,0319
Hg	292,00	0,0055

#### D. Bidang $p-v-T$ Gas Sempurna

Jika variabel  $p$ ,  $v$ , dan  $T$  dari persamaan keadaan gas sempurna dilukiskan pada tiga sumbu saling tegak lurus, maka terbentuklah bidang  $p-V-T$  atau keadaan gas sempurna. Bidang ini berbentuk paraboloid hiperbolik, seperti terlihat pada Gambar 3.1.



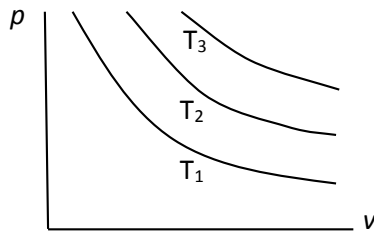
**Gambar 3.1.** Bidang  $p-V-T$  gas sempurna

Tiap keadaan seimbang berkaitan dengan sebuah titik pada bidang ini. Suatu proses kuasistatik dinyatakan oleh sebuah garis pada bidang tersebut. Proyeksi perpotongan bidang  $p-v-T$  dengan bidang-bidang datar yang tegak lurus sumbu  $T$  pada bidang  $p-v$  adalah proses isothermal dan grafiknya berupa hiperbola sama sisi (Gambar 3.2).

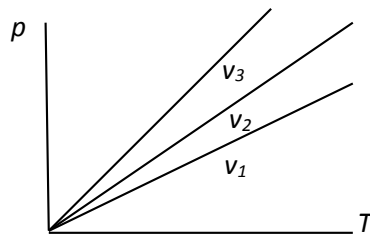
$$pv = RT = C \quad (3.11)$$

Proyeksi perpotongan bidang  $p-v-T$  dengan bidang-bidang datar tegak lurus sumbu  $v$  pada bidang  $p-T$  adalah proses isokhorik atau isometrik dan grafiknya berupa garis lurus (Gambar 3.3). Persamaan  $pv = RT$  dapat diubah menjadi

$$p = \frac{R}{v}T = CT \quad (3.12)$$



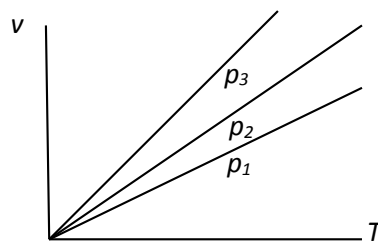
**Gambar 3.2.** Proses isothermal



**Gambar 3.3.** Proses isokhorik

Proyeksi perpotongan bidang  $p$ - $v$ - $T$  dengan bidang-bidang datar tegak lurus sumbu  $p$  pada bidang  $v$ - $T$  adalah proses isobarik, berupa garis lurus (Gambar 3.4). Persamaan  $p v = RT$  dapat diubah menjadi

$$v = \frac{R}{p} T = CT \quad (3.13)$$

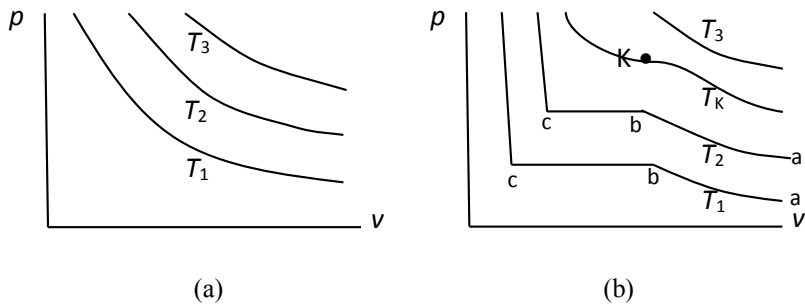


**Gambar 3.4.** Proses isobarik

### E. Bidang $p$ - $v$ - $T$ Gas Nyata

Sifat-sifat gas nyata menyimpang dari sifat-sifat gas sempurna. Molekul-molekul gas sempurna tidak tarik-menarik dan tidak mempunyai volume. Molekul-molekul gas nyata tarik-menarik serta mempunyai volume. Gas sempurna tak dapat menjadi cair dan padat, tetapi gas nyata dapat menjadi cair dan padat. Hukum-hukum Boyle dan Gay-Lussac hanya diikuti oleh gas nyata secara pendekatan, yaitu pada tekanan rendah jauh dari keadaan cairnya.

Perbedaan sifat gas nyata dengan gas sempurna tampak jelas pada diagram  $p$ - $v$  atau proses isothermal tampak pada Gambar 3.5 (a) dan (b).



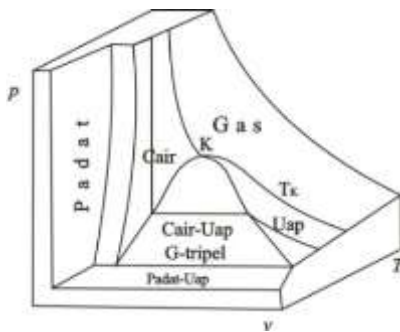
**Gambar 3.5.** Proses isothermal. (a) Gas sempurna, (b) Gas nyata

Pada gas sempurna setiap pemampatan (pengecilan volume) selalu diikuti oleh kenaikan tekanan, dan hal ini sesuai dengan hukum Boyle (Gambar 3.5 (a)). Pada gas nyata ketika tekanan masih rendah (volume besar), pemampatan juga diikuti oleh kenaikan tekanan seperti pada gas sempurna. Hal ini terlihat pada garis a-b (Gambar 3.5 (b)). Setelah itu walaupun volume diperkecil, tekanan tidak berubah (garis b-c). Garis b-c ini disebut garis koeksistensi cair-gas, yaitu bahwa fase cair dan gas (uap) dapat berada bersama. Di titik b mulai terbentuk cairan dan di titik c semua uap telah menjadi cair. Pemampatan selanjutnya akan diikuti oleh kenaikan tekanan yang besar, karena cairan suka sekali dimampatkan. Dalam proses pencairan atau kondensasi ini tentu saja energi panas perlu dikeluarkan dari sistem.

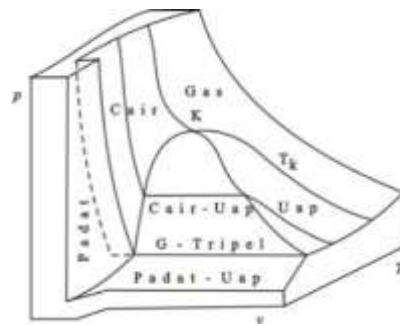
Jika proses ini diadakan pada suhu yang lebih tinggi ( $T_2 > T_1$ ), maka garis koeksistensi b-c menjadi lebih pendek dan pada suhu tertentu, yang disebut suhu kritis ( $T_k$ ), garis koeksistensi ini menjadi nol (titik b berimpit dengan titik c). Tekanan yang bersangkutan dengan suhu kritis ini disebut tekanan kritis ( $p_k$ ) dan volume kritis ( $v_k$ ). Saat di atas suhu kritis gas nyata tak dapat dicairkan dengan cara pemampatan. Di sini gas sejati mengikuti dengan baik hukum Boyle dalam kawasan yang agak luas.

Suatu zat nyata (*real substance*) dapat berada dalam fase gas pada suhu yang cukup tinggi dan tekanan rendah. Pada suhu rendah dan tekanan tinggi dapat terjadi transisi ke fase cair dan padat. Karena itu bidang  $p$ - $v$ - $T$  gas nyata hanyalah merupakan bagian dari bidang  $p$ - $v$ - $T$  zat nyata. Dalam hal ini perlu dibedakan adanya dua macam zat nyata, yaitu zat yang menyusut dan mengembang ketika membeku. Contoh jenis pertama adalah  $\text{CO}_2$  dan yang kedua air seperti yang terlukis pada Gambar

3.6 dan Gambar 3.7. Pada kedua gambar itu tampaklah adanya kawasan-kawasan tertentu yaitu jangkauan tertentu variabel-variabel, tempat zat itu hanya dapat berada dalam satu fase saja. Kawasan-kawasan itu adalah untuk fase padat, cair, uap, dan gas. Uap adalah gas yang suhunya dibawah suhu kritis. Kawasan-kawasan lain adalah kawasan koeksistensi, dua fase berada bersama dalam keseimbangan.

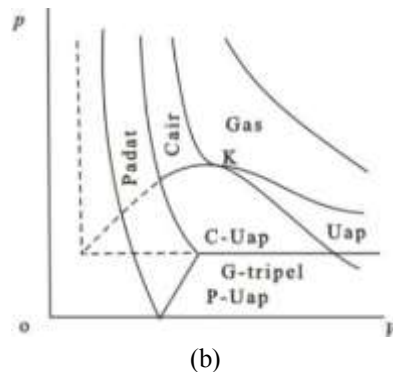
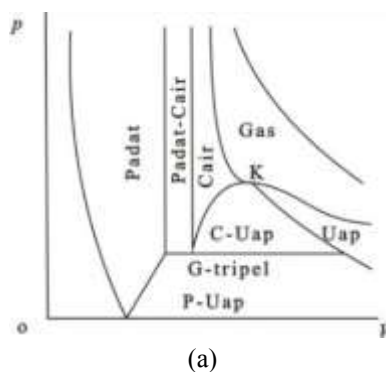


**Gambar 3.6.** Bidang  $p$ - $v$ - $T$  zat yang menyusut saat membeku

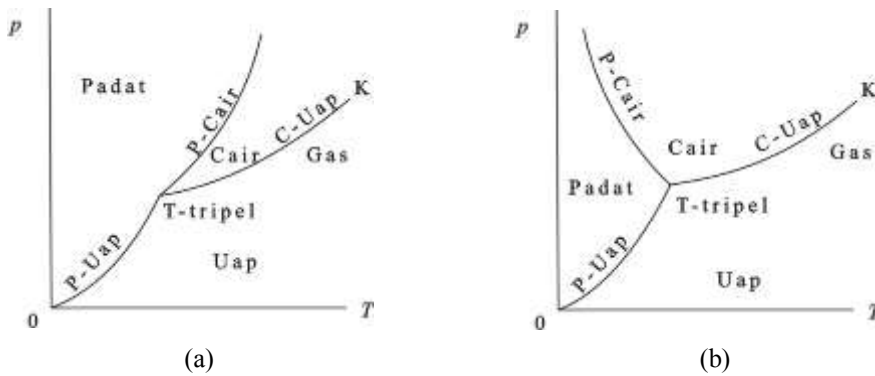


**Gambar 3.7.** Bidang  $p$ - $v$ - $T$  zat yang mengembang saat membeku

Diperlihatkan pula suatu garis yang disebut garis tripel, tempat ketiga fase dapat berada bersama. Seperti pada gambar sempurna, maka tiap garis pada bidang  $p$ - $v$ - $T$  ini menyatakan proses kuasistatik yang mungkin terjadi. Semua irisan dengan bidang-bidang datar tegak lurus sumbu  $T$ , menyatakan proses isothermal. Grafiknya dalam diagram  $p$ - $v$  terlihat pada Gambar 3.8 (a) dan (b). Proses isokhorik yang merupakan perpotongan bidang-bidang datar tegak lurus sumbu  $v$  dengan bidang  $p$ - $v$ - $T$  ini diperlihatkan pada Gambar 3.9 (a) dan (b).



**Gambar 3.8.** (a) Untuk zat yang menyusut pada pembekuan, (b) Untuk zat yang mengembang pada pembekuan



**Gambar 3.9.** (a) Untuk zat yang menyusut pada pembekuan, (b) Untuk zat yang mengembang pada pembekuan

Pada grafik Gambar 3.9 (a) dan (b), terlihat kurva yang menunjukkan fase cair-uap berada bersama dalam kesetimbangan (pada tekanan 1 atm titik didihnya 100 °C). Terlihat pula kurva dimana fase padat-cair berada bersama dalam kesetimbangan (pada tekanan 1 atm titik bekunya 0 °C). Dan kurva yang paling bawah menunjukkan sublimasi padat-uap (sublimasi adalah proses dimana pada tekanan rendah fase padat langsung berubah menjadi uap tanpa melewati fase cairnya terlebih dahulu). Ketiga kurva ini terhubung menjadi suatu titik yang disebut dengan titik tripel.

Pada padat-uap, kurvanya miring ke kiri. Hal ini karena pada tekanan yang lebih tinggi zat yang memuai ketika membeku mengalami kenaikan temperatur. Begitu pula sebaliknya zat yang menyusut ketika membeku.

Garis-garis tripel pada Gambar 3.6 dan Gambar 3.7 kalau diproyeksikan pada bidang  $p$ - $T$  berbentuk titik dan disebut titik tripel. Data titik tripel untuk beberapa zat diperhatikan pada Tabel 3.2. Suhu titik tripel air adalah titik tetap standar yang diberi angka 273,16 K.

Uap dan cairan di kawasan koeksistensi disebut uap jenuh dan cairan jenuh. Tekanan oleh uap jenuh disebut tekanan uap. Tentu saja tekanan uap adalah fungsi suhu yang akan naik. Pada diagram  $p$ - $T$  diperlihatkan kurva tekanan uap. Bentuk umum kurva ini untuk semua zat adalah sama, tetapi tekanan uap pada suhu tertentu sangat bervariasi antara satu zat dengan zat yang lain.



**Tabel 3.2.** Data Titik Tripel

Zat	Suhu (K)	Tekanan (Torr)
Helium	2,186	38,300
Hidrogen	13,840	52,800
Deuterium	18,630	128,800
Neon	24,630	324,000
Nitrogen	63,180	94,000
Oksigen	54,360	1,140
Amonia	195,400	45,570
Karbon dioksida	216,550	388,000
Sulfur dioksida	197,680	1,256
Air	273,160	4,580

Jika pada proses pemampatan isothermal dilanjutkan setelah semua mencair, maka pada suatu saat timbullah kristal-kristal zat padat, yaitu di kawasan koeksistensi padat-cair. Pada kawasan ini tekanan tetap konstan. Pemanpatan selanjutnya akan diikuti oleh kenaikan tekanan yang besar, kecuali apabila terbentuk zat padat bentuk lain. Es adalah contoh untuk hal yang kedua ini. Paling sedikit dapat diamati adanya tujuh bentuk zat padat yang berbeda pada tekanan yang sangat besar. Jika volume sistem secara perlahan-lahan diperbesar, maka semua proses seperti yang telah dijelaskan di atas terjadi pula, tetapi dengan arah yang berlawanan. Jika proses pemampatan isothermal dilakukan pada suhu yang lebih tinggi, kawasan cair-uap menjadi lebih pendek dan pada suhu kritis menjadi nol. Ini berarti bahwa volume jenis zat cair jenuh sama dengan volume jenis uap jenuh.

Koeksistensi antara fase padat dan uap mungkin pula terjadi, yaitu pada tekanan yang cukup tinggi. Volume jenis cairan jenuh dan uap jenuh pada suhu kritis disebut volume jenis kritis ( $v_k$ ) dan tekanan yang bersangkutan disebut tekanan kritis ( $p_k$ ).

Jika suhu gas pada tekanan tertentu lebih tinggi dari suhu jenuh pada tekanan ini, maka dikatakan bahwa gas itu super panas (*superheated*) dan disebut uap superpanas (*superheated vapour*). Istilah ini tidak selalu diartikan suhu yang sangat tinggi. Suhu jenuh untuk nitrogen pada 0,8 bar adalah sekitar  $-197,9^\circ\text{C}$ , sehingga nitrogen dalam atmosfer selalu super panas.

Garis koeksistensi cair-uap menjadi lebih pendek pada suhu yang lebih tinggi dan menjadi nol pada suhu kritis. Timbul pertanyaan apakah hal demikian ini juga

terjadi pada garis koeksistensi padat-cair, sehingga terjadi pula suhu kritis untuk transisi padat-cair. Ternyata hal demikian belumpernah dijumpai. Jadi selalu ada perbedaan volume jenis atau massa jenis antara fase cair dan fase padat pada suhu dan tekanan sama. Ini tidak mengesampingkan kemungkinan adanya titik kritis semacam itu pada tekanan yang sangat tinggi.

**Tabel 3.3.** Tetapan Kritis

Zat	$T_k$ (K)	$p_k$ (Pa)	$v$ (m <sup>3</sup> /kmol)
Helium 4	5,25	1,16	0,0578
Helium 3	3,34	1,15	0,0726
Hidrogen	33,34	12,80	0,0650
Nitrogen	126,20	33,60	0,0901
Oksigen	154,80	50,20	0,0780
Amonia	405,50	111,00	0,0725
Freon 12	384,70	39,70	0,2180
Karbon dioksida	304,80	73,00	0,0940
Sulfur dioksida	430,70	77,80	0,1220
Air	647,40	209,00	0,0560
Karbon disulfida	552,00	78,00	0,1700

Contoh perubahan fase pada proses isobarik yang sering kita jumpai adalah zat cair dalam bejana terbuka yang dididihkan. Pada titik didih zat cair itu terpisah menjadi dua fase, yaitu cairan dan uap. Volume jenis fase uap jauh lebih besar daripada volume jenis cairan, sehingga volume jenis sistem naik besar sekali. Jika bejana terbuka, uap akan keluar dari bejana dan masuk ke dalam udara. Titik didih cairan dalam hal ini tidak lain adalah suhu yang bersangkutan dengan tekanan uap yang sama dengan tekanan udara luar. Jika proses dibalik, yaitu suhu cairan dalam bejana berangsur-angsur diturunkan, maka pada suatu suhu tertentu (titik beku), zat tersebut akan terbagi lagi menjadi dua fase (padat dan cair). Untuk menurunkan suhu tentu energi panas harus dikeluarkan dari sistem. Pada garis koeksistensi padat-cair, suhu tidak turun walaupun energi panas dikeluarkan, sampai semua cairan membeku.

Fase cair tak dapat berada pada suhu yang lebih rendah dari titik tripel, atau pada tekanan yang lebih rendah dari tekanan pada titik tripel. Jika lebih rendah dari tekanan pada titik tripel, zat hanya dapat berada pada fase padat dan uap saja. Transisi dari yang satu kepada yang lain berlangsung pada suhu sublimasi,  $T_s$ . Dalam hal air,

dapat terjadi peristiwa yang disebut anomali. Air dapat berada dalam fase cair walaupun suhunya lebih rendah daripada titik tripel.

#### F. Persamaan Keadaan Sistem Lain

Asas termodinamika berlaku umum tidak terbatas pada gas, cairan dan zat padat di bawah tekanan hidrostatis yang seragam atau homogen. Variable-variabel intensif dan ekstensif yang bersangkutan mungkin berbeda, namun suhu sistem selalu merupakan sifat termodinamik yang mendasar.

Ditinjau dari sebuah batang atau kawat yang mengalami tegangan. Panjang kawat atau batang ini  $L$ ,  $\mathcal{F}$ , dan  $T$  adalah persamaan keadaan kawat tersebut. Jika kawat meregang tidak melampaui batas elastisitas, dan jika suhu tidak terlalu jauh dari suhu acuan  $T_0$ , maka persamaan kawat adalah:

$$L = L_0 \left[ 1 + \frac{\mathcal{F}}{YA} + \alpha (T - T_0) \right] \quad (3.14)$$

$L_0$  = panjang kawat tanpa tegangan pada suhu  $T_0$

$Y$  = modulus Young (modulus regangan isothermal)

$A$  = luas penampang kawat

$\alpha$  = koefisien muai linear

Pada contoh ini  $\mathcal{F}$  adalah variabel intensif dan  $L$  variabel ekstensif.

Momen magnetik  $M$  dari suatu zat paramagnetik yang terdapat dalam medan magnetik seragam dengan intensitas, adalah tergantung pada maupun suhu  $T$ . Kecuali pada suhu yang sangat rendah dan di dalam medan magnetik yang besar, maka momen magnetik dapat dinyatakan dengan ketepatan yang cukup oleh persamaan:

$$M = Cc \frac{x}{T} \quad (3.15)$$

$C_c$  = tetapan yang nilainya tergantung pada jenis zat dan disebut tetapan Curie. Persamaan ini dikenal sebagai hukum Curie.  $x$  adalah variabel intensif dan  $M$  variabel ekstensif.

Momen dipol  $P$  suatu dielektrik di dalam medan listrik luar  $E$  dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$P = \left( a + \frac{b}{T} \right) E \quad (3.16)$$

Lapisan permukaan suatu cairan dapat pula dianggap sebagai sistem termodinamika, meskipun bukan sistem yang tertutup. Sebab jika luas permukaan dari sejumlah massa cairan berubah, maka molekul-molekulnya pindah dari cairan ke permukaan atau sebaliknya. Variabel yang penting adalah tegangan permukaan, yang dapat didefinisikan sebagai gaya per satuan panjang yang ditimbulkan oleh lapisan itu pada perbatasannya. Variabel ekstensif yang bersangkutan adalah luas lapisan permukaan. Tegangan permukaan ini tak tergantung pada luas lapisan dan hanya tergantung pada suhu. Untuk semua cairan, tegangan muka menurun dengan kenaikan suhu dan menjadi nol pada suhu kritis. Secara pendekatan, tegangan permukaan dapat dinyatakan oleh persamaan:

$$\sigma = \sigma_0 \left( \frac{T_k - T}{T_k - T_0} \right) \quad (3.17)$$

$\sigma_0$  = tegangan muka pada suhu  $T_0$

Sistem termodinamika lain yang sangat penting dalam kimia fisika adalah sel elektrolitik. Variabel intensifnya adalah muatan, yang nilai mutlaknya tidak penting, melainkan besar muatan yang mengalir melewati suatu titik dalam rangkaian yang sebanding dengan jumlah mol yang bereaksi dalam sel dalam proses tersebut. Tegangan gerak elektrik (tge) ini dapat dinyatakan sebagai:

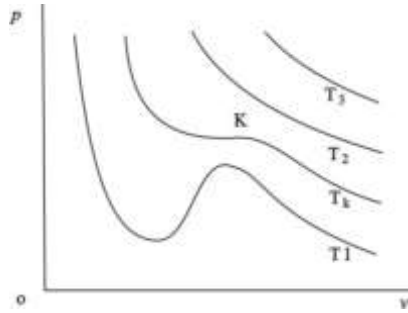
$$s = s_{20} + \alpha (t - 20^\circ) + \beta (t - 20^\circ)^2 + \gamma (t - 20^\circ)^3 \quad (3.18)$$

Variabel  $t$  menyatakan suhu dalam  $^\circ\text{C}$ ,  $s_{20}$  = tge pada  $20^\circ\text{C}$ , dan  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  adalah tetapan yang bergantung pada jenis zat yang membentuk sel.

## G. Tetapan Gas Van der Waals

Grafik persamaan Van der Waals untuk beberapa suhu dalam diagram  $p$ - $v$  adalah seperti terlukis pada Gambar 3.10. Tampak bahwa pada suhu di bawah suhu kritis grafik untuk gas ini berbeda dengan grafik untuk gas nyata (Gambar 3.5b), yaitu bahwa untuk satu nilai  $p$  terdapat tiga nilai  $v$ . Hal ini disebabkan karena persamaan Van der Waals dapat diubah menjadi persamaan derajat tiga dalam  $v$ .

$$\left( p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT$$



**Gambar 3.10.** Diagram  $p$ - $v$  gas Van der Waals

Bila ruas kiri dan kanan dikalikan dengan  $v^2/p$  diperoleh

$$\left(v^2 + \frac{a}{p}\right)(v - b) = RT \frac{v^2}{p}$$

Selanjutnya dapat disusun menjadi

$$v^3 - \left(b + \frac{RT}{p}\right)v^2 + \frac{a}{p}v - \frac{ab}{p} = 0 \quad (3.19)$$

Persamaan (3.19), adalah persamaan derajat tiga dalam  $v$ , jadi mempunyai tiga akar  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$ . Pada suhu kritis  $T_k$ , ketiga akar berimpit dan tekanan yang bersangkutan adalah tekanan kritis  $p_k$ . Jadi persamaan

$$v^3 - \left(b + \frac{RT_k}{p_k}\right)v^2 + \frac{a}{p_k}v - \frac{ab}{p_k} = 0 \quad (3.20)$$

mempunyai tiga akar nyata yang sama yaitu  $v_k$ . Akan tetapi persamaan derajat tiga dalam  $v$  yang ketiga akarnya sama dengan  $v_k$  adalah juga

$$(v - v_k)^3 = v^3 - 3v_k v^2 + 3v_k^2 v - v_k^3 = 0 \quad (3.21)$$

Persamaan (3.20) dan (3.21) adalah identik, sehingga koefisien yang bersangkutan dapat disamakan.

$$\text{I.} \quad 3v_k = b + \frac{RT_k}{p_k}$$

$$\text{II.} \quad v_k^2 = \frac{a}{p_k}$$

$$\text{III.} \quad v_k^3 = \frac{ab}{p_k}$$

Dari ketiga persamaan ini dapat diperoleh

$$v_k = 3b \quad p_k = \frac{a}{27b^2} \quad (3.22)$$

$$T_k = \frac{8a}{27bR} \quad \frac{p_k v_k}{T_k} = \frac{3}{8} R \quad (3.23)$$

Menurut Persamaan (3.23) sebelah kanan,  $\frac{RT_k}{p_k v_k} = \frac{8}{3} = 2,67$ , dan hasil percobaan untuk beberapa gas adalah sebagai berikut.

$$\begin{array}{ll} \text{He} = 3,13 & \text{CO}_2 = 3,49 \\ \text{H}_2 = 3,03 & \text{C}_6\text{H}_6 = 3,76 \end{array}$$

Menurut Persamaan (3.22) sebelah kiri,  $\frac{v_k}{b} = 3$ , dan hasil percobaan untuk beberapa gas adalah

$$\begin{array}{ll} \text{A} = 1,41 & \text{CO}_2 = 1,86 \\ \text{H}_2 = 2,80 & \text{O}_2 = 1,89 \end{array}$$

Persamaan (3.22) dan (3.23) dapat juga dijabarkan dengan mengingat bahwa isothermal kritis dalam, diagram  $p$ - $v$  di titik kritis mempunyai titik belok dengan garis singgung mendatar, sehingga

$$\left[ \frac{\partial p}{\partial v} \right]_T = 0 \quad \text{dan} \quad \left[ \frac{\partial^2 p}{\partial v^2} \right]_T = 0$$

Persamaan Van der Waals dapat diubah menjadi

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}$$

$$\text{jadi, } \left[ \frac{\partial p}{\partial v} \right]_T = -\frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^3} \quad \text{dan} \quad \left[ \frac{\partial^2 p}{\partial v^2} \right]_T = \frac{2RT}{(v-b)^3} - \frac{6a}{v^4}$$

Jika  $T = T_k$  dan  $v = v_k$ , maka kedua persamaan di atas = 0, sehingga diperoleh

$$\frac{RT_k}{(v_k-b)^2} = \frac{2a}{v_k^3} \quad \text{dan} \quad \frac{2RT_k}{(v_k-b)^3} = \frac{6a}{v_k^4}$$

Bila persamaan pertama dibagi dengan persamaan kedua akan diperoleh hasil

$$\frac{v_k-b}{2} = \frac{v_k}{3} \quad \text{atau} \quad v_k = 3b$$

Jika hasil ini dimasukkan pada salah satu persamaan di atas akan diperoleh

$$T_k = \frac{8a}{27bR}$$

Selanjutnya dengan perantaraan persamaan keadaannya akan diperoleh

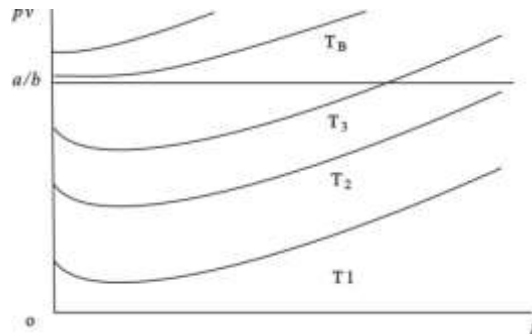
$$p_k = \frac{a}{27b^2}$$

## H. Diagram $p$ - $v$ Gas Van der Waals, Suhu Boyle

Persamaan Van der Waals dapat diubah menjadi

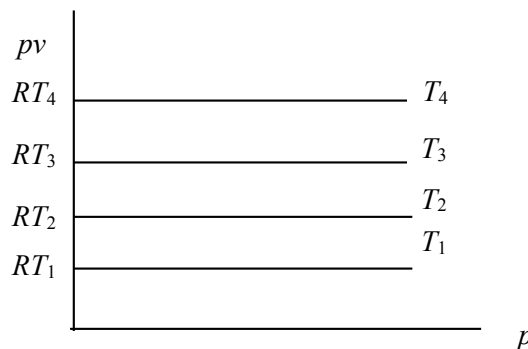
$$pv = RT \frac{v}{v-b} - \frac{a}{v} \quad (3.24)$$

Dari persamaan ini maka tampak bahwa  $pv$  adalah fungsi dari  $v$ . Akan tetapi karena  $v$  sendiri adalah juga fungsi  $p$ , maka dapat disimpulkan bahwa  $pv$  juga fungsi  $p$ . Diagram  $pv-p$  untuk gas Van der Waals terlukis seperti pada Gambar 3.11.



**Gambar 3.11.** Diagram  $pv-p$  gas Van der Waals

Sementara itu pada Gambar 3.12 terlukis diagram  $pv-p$  gas sempurna sebagai perbandingan. Pada gas sempurna garis isotermal-isotermal tersebut selalu sejajar dengan sumbu  $p$ . Pada gas Van der Waals atau gas nyata, umumnya garis isotermal-isotermal itu menurun dahulu. Pada suhu tertentu, yaitu yang disebut suhu Boyle, isotermal yang bersangkutan mempunyai garis singgung mendatar pada  $p=0$ . Karena itu isotermal Boyle dekat  $p=0$  hanya sedikit menyimpang dari garis isotermal gas sempurna. Jadi pada suhu Boyle gas nyata mengikuti dengan baik hukum Boyle dalam kawasan yang agak luas. Isotermal pada suhu yang lebih tinggi dari suhu Boyle segera mendaki mulai dari  $p = 0$ . Bagi gas Van der Waals dapat dibuktikan bahwa titik-titik minimum isotermal-isotermal itu terletak pada sebuah parabola.



**Gambar 3.12.** Diagram  $pv-p$  gas sempurna

Dari Persamaan (3.24) dapat diturunkan sebagai syarat minimum

$$\frac{d(pv)}{dp} = \frac{d(pv)}{dv} \cdot \frac{dv}{dp} = 0$$

$$\left[ RT \frac{v-b-v}{(v-b)^2} + \frac{a}{v^2} \right] \cdot \frac{dv}{dp} = 0$$

sehingga

$$RT = \frac{a}{b} \left[ \frac{v-b}{v} \right]^2 \quad (3.25)$$

Persamaan keadaan Van der Waals sendiri dapat ditulis sebagai

$$RT = \left[ p + \frac{a}{v^2} \right] (v-b) \quad (3.26)$$

Dari kedua persamaan yang terakhir ini diperoleh

$$\left[ p + \frac{a}{v^2} \right] (v-b) = \frac{a}{b} \left[ \frac{v-b}{v} \right]^2$$

atau

$$p + \frac{a}{v^2} = \frac{a}{b} \left[ \frac{v-b}{v^2} \right]$$

Jika ruas kiri dan kanan dikalikan dengan  $pv^2$ , diperoleh

$$(pv)^2 + ap = \frac{ap}{b} (v-b)$$

atau

$$(pv)^2 - \frac{a}{b} (pv) + 2ap = 0 \quad (3.27)$$

Persamaan (3.27) adalah persamaan derajat dua dalam  $pv$ , dan grafiknya berupa parabola, dan parabola ini merupakan tempat kedudukan semua titik minimum pada grafik  $pv$ - $p$ . Persamaan (3.27) dapat diubah menjadi persamaan lain yang berbentuk  $p = f(pv)$ .

$$p = -\frac{1}{2a} (pv)^2 = \frac{1}{2b} (pv) = pv \left[ -\frac{1}{2a} (pv) + \frac{1}{2b} \right]$$

Untuk  $p = 0$  maka  $pv = 0$  dan  $\frac{a}{b}$ . Jadi parabola itu memotong sumbu  $pv$  pada titik 0 dan  $a/b$ . Titik puncaknya dapat diperoleh dengan menghitung  $\frac{dp}{d(pv)}$  dan disamakan dengan nol.

$$\frac{dp}{d(pv)} = pv \left[ -\frac{1}{2a} \right] + \left[ -\frac{1}{2a} (pv) + \frac{1}{2b} \right] = 0$$



$$-\frac{1}{a}(pv) + \frac{1}{2b} = 0$$

$$pv = \frac{a}{2b}$$

Bila nilai untuk  $pv$  ini dimasukkan ke dalam persamaan  $p = f(pv)$  yang tertera di atas maka akan diperoleh

$$p = \frac{a}{8b^2}$$

Jadi koordinat titik puncaknya, P, adalah

$$p \left[ \frac{a}{8b^2}, \frac{a}{2b} \right]$$

Isotermal Boyle mempunyai titik minimum pada  $p = 0$ . Untuk  $p = 0$ , maka  $v = \infty$ , sebab  $pv$  mempunyai nilai terhingga. Oleh karena itu maka  $\frac{v-b}{v} = 1$  dan Persamaan (3.25) menjadi  $RT = a/b$ . Jadi suhu Boyle

$$T_B = \frac{a}{bR} \quad (3.28)$$

### 1. Hukum Keadaan Bersesuaian (*The Law of Corresponding States*)

Semua gas sempurna sifatnya sama, yaitu mengikuti satu hukum gas sempurna  $pv = RT$  yang tidak menggantung tetapan individual. Bidang keadaan semua gas berimpit sempurna. Jika dua dari tiga besaran  $p$ ,  $v$  dan  $T$  untuk berbagai gas sama, maka yang ketiga pun sama.

Gas-gas nyata sifatnya seakan-akan berlainan. Persamaan gas nyata, misalnya gas Van der Waals, mengandung tetapan-tetapan individual, sehingga jika dua dari tiga besaran  $p$ ,  $v$  dan  $T$  sama untuk berbagai gas, maka yang tiga pada umumnya tidak sama. Meskipun demikian dalam tahun 1881 Van der Waals telah menemukan hukum keadaan bersesuaian (*the law of corresponding states*), yang menyatakan bahwa sifat semua gas nyata juga sama asalkan tekanan, volume dan suhu dinyatakan dalam tekanan tereduksi  $\pi = p/p_k$ , volume tereduksi  $\varphi = v/v_k$  dan suhu tereduksi  $\tau = T/T_k$ . Dalam besaran-besaran tereduksi ini, maka semua gas nyata mengikuti persamaan keadaan  $f(\pi, \varphi, \tau) = 0$  yang tidak lagi mengandung tetapan pribadi. Jadi bidang keadaan tereduksi semua gas nyata berimpit. Jika dua dari tiga besaran  $\pi$ ,  $\varphi$ , dan  $\tau$  sama untuk

berbagai gas, maka yang ketiga pun sama. Untuk gas Van der Waals, maka  $f(\pi, \varphi, \tau)$  dapat dijabarkan seperti di bawah ini.

$$p = \pi p_k = \frac{\pi a}{27b^2}$$

$$v = \varphi v_k = 3\varphi b$$

$$T = \tau T_k = \frac{8\tau a}{27bR}$$

Jika dimasukkan kedalam persamaan Van der Waals, diperoleh

$$\left[ \frac{\pi a}{27b^2} + \frac{a}{9\varphi^2 b^2} \right] (3\varphi b - b) = R \frac{8\tau a}{27bR}$$

yang selanjutnya dapat disederhanakan menjadi

$$\left[ \pi + \frac{3}{\varphi^2} \right] (3\varphi - 1) = 8\tau \quad (3.29)$$

Persamaan ini tidak lagi mengandung tetapan individual dan berlaku untuk semua zat. Hukum keadaan bersesuaian berlaku lebih luas dan lebih tepat dari pada persamaan Van der Waals. Hukum keadaan bersesuaian berlaku pula untuk gas-gas yang bukannya Van der Waals. Jadi untuk semua gas berlaku  $f(\pi, \varphi, \tau) = 0$  yaitu persamaan keadaan tereduksi, yang tidak lagi mengandung tetapan individual, meskipun bentuknya lain dari Persamaan (3.29).

#### J. Diagram $\pi\varphi - \pi$ Van der Waals, Suhu Boyle Tereduksi

Telah dijabarkan persamaan keadaan Van der Waals tereduksi, yaitu

$$\left[ \pi + \frac{3}{\varphi^2} \right] (3\varphi - 1) = 8\tau$$

Persamaan ini dapat diubah bentuknya menjadi

$$\pi = \frac{8\tau}{3\varphi - 1} - \frac{3}{\varphi^2}$$

Selanjutnya ruas kiri dan ruas kanan dikalikan dengan  $\varphi$

$$\pi\varphi = 8\tau \frac{\varphi}{3\varphi - 1} - \frac{3}{\varphi} \quad (3.30)$$

Gambar 3.13 melukiskan diagram  $\pi\varphi - \pi$ . Titik-titik minimum terdapat pada

$$\frac{d(\pi\varphi)}{d\pi} = \frac{d(\pi\varphi)}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{d\pi} = 0$$

$$\left[ 8\tau \frac{3\varphi-1-3\varphi}{(3\varphi-1)^2} + \frac{3}{\varphi^2} \right] \cdot \frac{d\varphi}{d\pi} = 0$$

jadi

$$-\frac{8\tau}{(3\varphi-1)^2} + \frac{3}{\varphi^2} = 0$$

atau

$$8\tau = \frac{3(3\varphi-1)^2}{\varphi^2}$$

Dari Persamaan (3.29)

$$8\tau = \left[ \pi + \frac{3\varphi}{\varphi^2} \right] (3\varphi - 1)$$

dari kedua persamaan terakhir ini diperoleh

$$\pi + \frac{3}{\varphi^2} = \frac{3(3\varphi-1)}{\varphi^2}$$

kedua ruas dikalikan dengan  $\pi\varphi^2$  memberikan

$$(\pi\varphi)^2 + 3\pi = 3\pi(3\varphi - 1)$$

atau

$$(\pi\varphi)^2 - 9\pi\varphi + 6\pi = 0 \tag{3.31}$$

Persamaan (3.31) melukiskan suatu parabola yang memotong sumbu  $\pi\varphi$  di titik 0 dan 9 sedangkan puncaknya di titik  $(4\frac{1}{2}, 3\frac{3}{8})$ . Untuk membuktikan hal ini, terlebih dahulu

Persamaan (3.31) diubah menjadi bentuk  $\pi = f(\pi\varphi)$ , yaitu

$$\pi = -\frac{1}{6}(\pi\varphi)^2 + \frac{9}{6}\pi\varphi \tag{3.31a}$$

Perpotongan suatu grafik dengan sumbu  $\pi\varphi$  berarti  $\pi = 0$ , sehingga dari persamaan terakhir ini diperoleh

$$(\pi\varphi)^2 - 9\pi\varphi = 0$$

yang menghasilkan

$$\pi\varphi = 0 \text{ dan } \pi\varphi = 9$$

Syarat maksimum ialah  $\frac{d\pi}{d(\pi\varphi)} = 0$  sehingga

$$-\frac{1}{3}\pi\varphi + \frac{9}{6} = 0$$

dan ini menghasilkan

$$\pi\varphi = 4,5$$

Bila hasil ini dimasukkan ke dalam Persamaan (3.31a) akan diperoleh

$$\pi = 3,375$$

Suhu Boyle tereduksi

$$\tau_B = \frac{T_B}{T_k} = \frac{a/bR}{8a/27bR} = \frac{27}{8} = 3,375$$

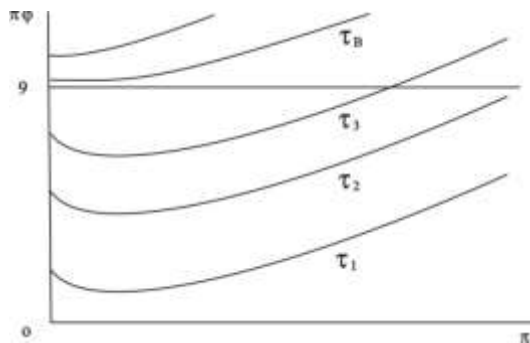
Isotermal tereduksi kritis

$$\tau_k = \frac{T_k}{T_k} = 1$$

Untuk  $\tau = \frac{T}{T_k} = 0$ , maka dari Persamaan (2.29)

$$3\varphi - 1 = 0 \text{ atau } \varphi = \frac{1}{3} \text{ atau } \pi\varphi = \frac{1}{3}\pi$$

Jadi isotermal  $\tau = 0$  adalah garis lurus dengan koefisien arah  $\frac{1}{3}$ .



**Gambar 3.13.** Diagram  $\pi\varphi - \pi$  gas Van der Waals

## K. Contoh Soal



Contoh

3.1

Berapakah tekanan yang ditimbulkan oleh 3 gram gas nitrogen di dalam bejana yang volumenya 5 liter pada suhu  $17^\circ\text{C}$ ? Diketahui massa relatif molekul nitrogen 28 yang dianggap sebagai gas sempurna. Nyatakanlah jawaban dalam satuan atmosfer dan pascal.

## Penyelesaian



Diketahui:  $p = 3 \text{ kg}$ ;  $v = 5 \text{ liter}$ ;  $T = 17^\circ\text{C}$

Ditanya: Nyatakanlah jawaban dalam satuan atmosfer dan pascal.

Jawab

Rumus yang digunakan:  $pV = \frac{m}{M}RT$  diubah menjadi  $p = \frac{m}{M} \frac{R}{V} T$

Rumus  $pV = \frac{m}{M}RT$  diubah menjadi  $p = \frac{m}{M} \frac{R}{V} T$ , selanjutnya nilai-nilai yang diketahui dimasukkan. Jadi

$$p = \frac{3 \text{ g}}{28 \text{ g mol}^{-1}} \frac{0,082 \text{ l atm mol}^{-1} \text{K}^{-1}}{5 \text{ l}} 290 \text{ K} = 0,51 \text{ atm}$$

Untuk menyatakan jawaban dalam pascal dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu yang pertama hanya dengan mengalihkan jawaban di atas dengan faktor konversinya dan yang kedua dengan merubah dahulu semua satuan yang diketahui menjadi satuan SI.

*Cara pertama*

Dari hasil di atas,  $p = 0,51 \text{ atm} = 0,51 \times 1,013 25 \times 10^5 \text{ Pa} = 51,67 \text{ kPa}$

*Cara kedua*

$m = 3 \text{ g} = 3 \times 10^{-3} \text{ kg}$ ,  $M_r = 28 \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$ ,  $V = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ,  $T = 290 \text{ K}$

dan  $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ , sehingga

$$p = \frac{(3 \times 10^{-3} \text{ kg})(8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{K}^{-1})(290 \text{ K})}{(28 \times 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1})(5 \times 10^{-3} \text{ m}^3)} = 51,67 \text{ kPa}$$

Periksa  
Kembali





Contoh

3.2

Sebuah bejana volume 2 liter dilengkapi dengan kran, berisi gas oksigen pada suhu 300 K dan tekanan 1 atm. Sistem dipanasi hingga suhunya menjadi 400K dengan kran terbuka. Kran lalu ditutup dan bejana dibiarkan mendingin kembali sampai suhu semula. (a) Berapakah tekanan akhir? (b) Berapa gram oksigen yang masih terdapat dalam bejana?

### Penyelesaian

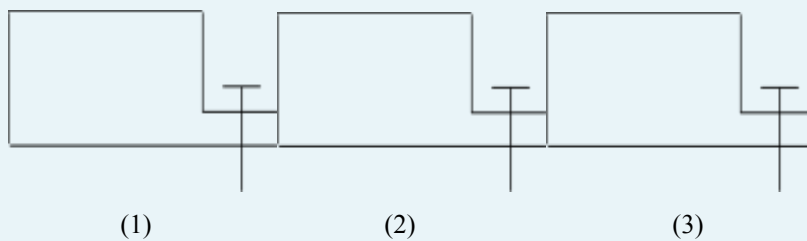
*Diketahui:*  $p_1 = 1 \text{ atm}$  ;  $p_2 = 1 \text{ atm}$ ;  $V_1 = 2 \text{ l}$ ;  $T_1 = 300 \text{ K}$

*Ditanya:* (a)  $p_3 = ?$

(b) Berapa gram oksigen yang masih terdapat dalam bejana?

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*  $p_2V_2 = \frac{m}{M}RT_2$  dan  $p_3V_3 = \frac{m}{M}RT_3$



Gambar 3.14.



$p_1 = 1 \text{ atm}$	$p_2 = 1 \text{ atm}$	$p_3 = ?$
$V_1 = 2 \text{ l}$	$V_1 = 2 \text{ l}$	$V_3 = 2 \text{ l}$
$T_1 = 300 \text{ K}$	$T_1 = 400 \text{ K}$	$T_3 = 300 \text{ K}$

Pada proses dari keadaan (1) ke keadaan (2) sistem dipanaskan dengan kran tetap terbuka. Ini berarti bahwa tekanan tetap sama dengan tekanan udara luar yaitu 1 atm. Volume bejana karena dipanaskan tentunya akan bertambah, tetapi perubahan volume itu pastilah jauh lebih kecil dari angka 2 liter, sehingga boleh diabaikan. Dengan pula setelah mendinginkan kembali volume tetap 2 liter. Keadaan (2) dan (3) mempunyai masa yang sama, sebab pada waktu mendingin kran di tutup. Pada keadaan (2) dan (3) berlaku

$$p_2 V_2 = \frac{m}{M} RT_2 \text{ dan } p_3 V_3 = \frac{m}{M} RT_3$$

Kalau persamaan pertama dibagi dengan persamaan kedua dengan mengingat bahwa  $V_2 = V_3$ , maka hasilnya adalah

$$\frac{p_2}{p_3} = \frac{T_2}{T_3} \text{ atau } p_3 = \frac{T_3}{T_2} p_2$$

jadi

$$p_3 = \frac{300 \text{ K}}{400 \text{ K}} \times 1 \text{ atm} = 0,75 \text{ atm}$$

Untuk mencari massa yang masih terdapat dalam bejana kita dapat menghitung dari keadaan (2) atau (3), yaitu keadaan setelah kran ditutup.

Misalkan dari keadaan (3),  $p_3 V_3 = \left(\frac{m}{M}\right) RT_3$  yang dapat diubah menjadi  $m = p_3 V_3 M / (RT_3)$ . Jadi

$$m = (0,75 \text{ atm})(2 \text{ l})(32 \text{ gmol}^{-1}) / (0,082 \text{ latmmol}^{-1} \text{K}^{-1} \times 300 \text{ K})$$

$$m = 1,95 \text{ g}$$

Periksa  
Kembali



Contoh

3.3

Sebuah gelembung udara berjari-jari 1 cm terbentuk di dasar telaga sedalam 2 m yang suhunya 4 °C dan naik ke permukaan air yang suhunya 27 °C. Jika suhu gelembung selalu sama dengan suhu disekitarnya, berapakah jari-jari gelembung udara ketika sampai di permukaan air? Diketahui tekanan udara luar 1 atmosfer.

#### Penyelesaian

*Diketahui:*  $r = 1$  cm; di dasar telaga sedalam 2 m;  $T_1 = 4$  °C;  $T_2 = 27$  °C

*Ditanya:* berapakah jari-jari gelembung udara ketika sampai di permukaan air?

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*  $p_1 v_1 = nRT_1$  dan  $p_2 v_2 = nRT_2$





Jika persamaan yang kedua dibagi dengan persamaan yang pertama

$$\frac{p_2 v_2}{p_1 v_1} = \frac{T_2}{T_1} \text{ atau } v_2 = \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1} v_1 \quad (\text{A})$$

Jika jari-jari gelembung di dasar dan permukaan adalah  $r_1$  dan  $r_2$ , maka

$$\frac{4}{3} \pi r_2^3 = \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1} \frac{4}{3} \pi r_1^3 \text{ atau } r_2^3 = \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1} r_1^3$$

Semua besaran di ruas kanan sudah diketahui besarnya kecuali  $p_1$ .

$$p_1 = 1 \text{ atm} + \rho g h$$

$$p_1 = 1,01325 \times 10^5 \text{ Pa} + (10^3 \text{ kg m}^{-3}) (9,8 \text{ m s}^{-2}) (2 \text{ m})$$

$$p_1 = 1,21 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Jika nilai ini dan nilai-nilai lain dimasukkan ke Persamaan (A) di atas akan di peroleh

$$r_2 = 1,1 \text{ cm}$$

Periksa  
Kembali



## L. Soal Latihan



Latihan

1

Sebuah bejana volume 2 liter berisi gas nitrogen pada tekanan 2 atm, dihubungkan dengan bejana lain volume 1 liter yang berisi gas oksigen pada tekanan 1 atm. Berapakah tekanan campuran gas?

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Sebuah kelep yang massanya  $m_k = 10 \text{ kg}$  menutupi 1 gram He (massa relatif molekul  $M_r = 4$ ) pada suhu  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  di dalam sebuah silinder yang luas penampang lintangnya  $100 \text{ cm}^2$ .

- Berapakah tinggi kelep di atas dasar silinder?
- Kalau gas dipanaskan hingga suhunya menjadi  $8,0 \text{ }^\circ\text{C}$ , berapakah tinggi kelep?
- Berapakah massa beban yang harus ditambahkan agar kelep kembali ke tempat semula? Diandaikan suhunya tetap  $8,0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

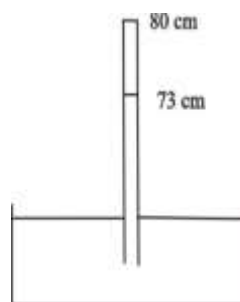
Jadi



Periksa  
Kembali



Sebuah barometer seperti pada Gambar (3.16) berisi udara di atas raksa sehingga hanya menunjukkan bilangan 73 cm pada keadaan tekanan udara luar 76 cmHg. (a) Jika tekanan udara luar 74 cmHg, berapakah bilangan yang ditunjukkannya? (b) Jika pada tekanan u dari udara luar 76 cmHg barometer ini ditekan sehingga volume udaranya menjadi  $\frac{1}{2}$  kali volume semula, berapakah bilangan yang ditunjukkan?



Gambar 3.16.

## Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Nilai  $pV/T$  gas  $\text{CO}_2$  pada tekanan  $3 \times 10^7$  Pa dan suhu 340 K adalah  $5 \times 10^3$  J  $\text{kmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ . (a) Hitunglah volume jenis molar  $\text{CO}_2$  pada keadaan tersebut. (b) Berapa kmol  $\text{CO}_2$  terdapat dalam sebuah tangki yang volumenya  $0,5$   $\text{m}^3$  pada keadaan tersebut? (c) Berapa kmol  $\text{CO}_2$  dalam tangki itu jika  $\text{CO}_2$  dianggap sebagai gas sempurna?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Sebuah pipa U dengan luasampang lintang  $1 \text{ cm}^2$  berisi raksa seperti pada Gambar 3.17 (1) dibawah ini. Tekanan barometer 750 Torr. Pipa kiri kemudian ditutup dan pipa kanan dihubungkan dengan pompa vakum seperti pada Gambar 3.17 (2). (a) Berapa cm raksa di pipa kiri akan turun? (b) Berapakah tekanan udara pada pipa kiri? Diandaikan suhu tidak berubah di udara dianggap sebagai gas sempurna.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Jika  $n$  mol gas sempurna dapat dipompa melalui sebuah pipa dengan diameter  $d$  pada suhu 4 K, berapakah diameter pipa yang harus digunakan agar supaya jumlah gas yang sama dapat dipompa melaluinya pada suhu 300 K?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

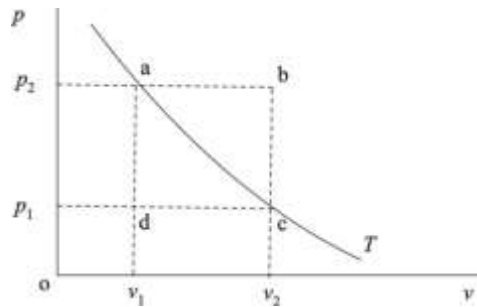
Jadi



Periksa  
Kembali



Pada grafik di bawah ini titik a dan c terletak pada satu isothermal  $T$  dan diketahui  $p_1 = 4 \times 10^3 \text{ Pa}$ ,  $p_2 = 10 \times 10^3 \text{ Pa}$ ,  $v_1 = 2,5 \text{ m}^3 \text{ kmol}^{-1}$ . Hitunglah (a) suhu  $T$ , (b) volume jenis  $v_2$ , (c) suhu pada titik b dan d, (d) volume total pada titik a jika sistem terdiri atas 4 kmol hidrogen, (e) massa hidrogen.



Gambar 3.18.

### Penyelesaian

*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



## M. Tugas



### Tugas

1

Sebuah tangki volume  $0,5 \text{ m}^3$  berisi gas oksigen pada tekanan  $1,5 \times 10^6 \text{ Pa}$  dan suhu  $26^\circ\text{C}$ . Hitunglah gas oksigen tersebut sempurna. a) Berapa kmol oksigen terdapat dalam tangki ini? b) berapa kg massa gas ini? c) berapakah tekanan gas jika suhunya naik menjadi  $500^\circ\text{C}$ ? d) pada suhu  $20^\circ\text{C}$ , berapa kmol gas dapat dikeluarkan agar tekanannya tinggal 10% dari tekanan semula?

#### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$  dan tekanan  $10^5$  Pa, maka 1,5 liter gas sempurna mempunyai massa 2,9 gram. a) berapakah berat molekul gas itu? b) Berapakah volume jenis molar gas ini? jika gas ini dipanaskan sampai suhunya menjadi  $100^{\circ}\text{C}$ , c) Berapakah tekanannya bila volumenya dibuat tetap? (e) Jika pada proses pemanasan itu terdapat kebocoran dan baru setelah suhunya mencapai  $100^{\circ}\text{C}$  kebocoran itu ditutup, berapa mol sisa gas itu pada (c) dan (d) ? Diketahui tekanan udara luar sama dengan  $10^5$  Pa.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Sejumlah udara terdapat dalam sebuah silinder yang dilengkapi dengan penghisap yang dapat bergerak. Mula-mula tekanan udaranya adalah  $2 \times 10^7$  Pa, volumenya  $0,5 \text{ m}^3$  dan suhunya 300 K. Andaikanlah bahwa udara itu sebagai gas sempurna. (a) Berapakah volume akhir udara jika mengalami ekspansi isothermal sampai tekanannya menjadi  $10^7$  Pa? (b) Berapakah suhu akhir udara jika pengisap ditahan ditempatnya semula dan sistem didinginkan sampai tekanannya menjadi  $10^7$  Pa? (c) Berapakah suhu dan volume akhir udara jika menjalani ekspansi isothermal dari keadaan awal sampai tekanannya menjadi  $1,5 \times 10^7$  Pa? (d) Berapakah suhu dan volume akhir udara jika didinginkan secara isokhorik hingga tekanan menjadi  $10^7$  Pa? (e) Buatlah grafik tiap proses itu pada sebuah diagram  $T-V$ .

#### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Tugas

4

Suatu gas sempurna pada tekanan 1 atm dipanaskan pada tekanan tetap sampai volumenya menjadi dua kali, kemudian dipanaskan pada volume tetap sampai tekanannya menjadi dua kali. Dan akhirnya dibiarkan menjalani ekspansi secara isothermal sampai tekanannya turun menjadi 1 atm. Gambarkan proses itu dalam diagram  $p$ - $V$ .

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Tugas

5

Sebuah bejana berisi 1 g gas oksigen pada tekanan 10 atm, dan suhu 47°C. Beberapa saat kemudian diketahui bahwa bejana itu bocor sehingga tekanannya turun menjadi  $\frac{1}{2}$  kali tekanan semula dan suhunya juga turun menjadi 27°C. (a) Berapakah volume bejana? (b) Berapa gram oksigen yang hilang karena bocor.

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali

Termodinamika memusatkan perhatiannya pada delapan besaran termodinamis atau koordinat sistem antara lain tekanan ( $p$ ), temperatur sistem ( $T$ ), volume sistem ( $V$ ), energi dalam sistem ( $U$ ), entalpi sistem ( $H$ ), entropi sistem ( $S$ ), energi bebas Gibbs ( $G$ ), energi bebas Helmholtz ( $F$ ). Delapan koordinat sistem ini merupakan besaran-besaran makroskopis yang melukiskan keadaan kesetimbangan sistem. Oleh karena itu, koordinat sistem sering disebut sebagai variabel keadaan sistem.

Eksperimen menunjukkan, bahwa tekanan gas ( $p$ ), volume gas ( $V$ ), dan temperatur gas ( $T$ ) mempunyai kaitan tertentu. Artinya, gas dapat diberi harga volume tertentu, misalnya 3 liter. Kemudian gas dipanaskan sampai temperatur tertentu, misalnya  $75^{\circ}\text{C}$ , ternyata tekanan gas sudah mempunyai harga yang pasti. Secara matematis, antara  $p$ ,  $V$ , dan  $T$  mempunyai hubungan fungsional:  $f(p, V, T) = 0$ . Dari hubungan empiris ini dapat dibuat prediksi-prediksi tertentu. Misalnya mengenai koefisien muai gas, kapasitas kalor gas, energi dalam gas, dan koordinat sistem lainnya.

Gas dengan jumlah partikel sebesar  $N$  ada dalam bejana yang tidak bocor. Selama komposisi gas tidak berubah, dalam arti tidak terjadi reaksi kimiawi yang dapat mengubah jumlah partikel gas dan tidak terjadi peristiwa difusi; maka dalam eksperimen, volume dan tekanan gas dapat diubah-ubah sesuai dengan kebutuhan. Ini berarti, pada volume tertentu ( $V$ ), gas dapat diberi temperatur ( $T$ ) berapa saja. Dapat pula, pada temperatur ( $T$ ) tertentu, gas dapat diberi harga volume ( $V$ ) berapa saja. Hal ini mungkin, karena terdapat koordinat ketiga yang menyesuaikan diri, yaitu: tekanan gas ( $p$ ). Jadi, variabel keadaan gas dapat dilukiskan dalam bentuk implisit dan eksplisit.

Kajian termodinamika memerlukan pengetahuan tentang diferensial eksak dan diferensial tak eksak dan cara untuk mengujinya. Hal ini penting karena pengetahuan tentang diferensial eksak dan diferensial tak eksak diperlukan untuk mengetahui sifat suatu fungsi apakah berasal dari fungsi atau bukan. Dalam termodinamika, juga

dipelajari perilaku zat atau bahan di bawah kontrol suhu, karena ilmu ini adalah cabang dari termofisika. Umumnya, jika suatu bahan dipanaskan maka bahan tersebut akan memuai. Sudah merupakan suatu keperluan, bahwa dalam fisika kita sering mewakili sifat suatu bahan dengan suatu koefisien tertentu. Untuk menyatakan mudah tidaknya suatu bahan untuk memuai, digunakan suatu koefisien yang disebut *koefisien muai kubik/koefisien ekspansi*. Selain mengenal koefisien, dalam termodinamika juga terdapat *kompresibilitas isothermal* suatu bahan.

## A. Turunan Parsial

Istilah tangen alfa ( $=tg \alpha$ ) pada sebuah grafik adalah hal yang sering dijumpai, namun jarang mendengar istilah *slope*. Lantas, apa perbedaan antara  $tg \alpha$  dengan *slope*? Keduanya bermakna kemiringan garis pada sebuah grafik. Namun perbedaannya,  $tg \alpha$  tidak bersatuan dan biasa dipakai dalam matematika murni, sedangkan *slope* mempunyai satuan dan biasa digunakan dalam ilmu fisika dan teknik. Misalnya saja, sumbu  $x$  adalah besaran kecepatan bersatuan (m/s) dan sumbu  $y$  merupakan besaran waktu bersatuan (s), maka *slope*-nya (berlambang  $a = \frac{\Delta y}{\Delta x}$  atau  $\frac{dy}{dx}$ ) bersatuan ( $m/s^2$ ).

Jika  $y = f(x)$ , maka  $\frac{dy}{dx}$  merupakan *slope* pada lengkung  $y = f(x)$ . Artinya, *slope* merupakan fraksi perubahan (*rate*) dari  $y$  terhadap  $x$ . Pengertian fraksi perubahan biasa digunakan pada fisika dan teknik, misalnya saja fraksi perubahan posisi terhadap waktu (= laju perubahan posisi) yang biasa disebut kecepatan, serta laju pendinginan benda panas. Selain itu, dikenal pula laju perubahan yang lain: fraksi perubahan volume gas terhadap tekanan, dan fraksi pengurangan volume bensin (di dalam tangki bahan bakar mobil) terhadap jarak yang ditempuh mobil itu. Persamaan yang memuat laju perubahan (baca: persamaan diferensial) biasa digunakan untuk menyelesaikan beragam persoalan pada ilmu terapan.

Pernyataan *slope*  $S = \frac{dy}{dx}$  dapat dimaknai sebagai hasil diferensial  $y$  terhadap  $x$ . Diferensial itu dapat digunakan untuk memperoleh titik maksimum pada sebuah lengkung. Selain itu, diferensial juga dapat digunakan untuk memperoleh bentuk deret dari sebuah fungsi. Kita bisa memanfaatkan persamaan diferensial jika kita dapat mengetahui fungsi dan semua variabel yang dikandungnya. Sebuah fungsi bisa



bergantung pada lebih dari satu variabel. Misalnya saja, benda mengalami gerak jatuh bebas. Besar gaya resultannya bergantung pada variabel kecepatan dan massa benda. Jadi apabila variabel yang satu berubah maka variabel yang lain juga akan berubah, untuk menentukan perubahan total suatu variabel akibat perubahan variabel lain tersebut maka digunakanlah turunan parsial.

## 1. Bentuk Implisit dan Eksplisit

Tinjau variabel makroskopik termodinamika  $p$ - $V$ - $T$ , pada volume ( $V$ ) dan temperatur ( $T$ ) diberikan nilai tertentu secara bebas, maka tekanan ( $p$ ) yang didapat akan menyesuaikan diri dengan nilai volume dan temperatur yang telah ada. Dari eksperimen ini tampak bahwa variabel volume ( $V$ ) dan temperatur ( $T$ ) termasuk variabel bebas sedangkan variabel tekanan ( $p$ ) termasuk variabel terikat. Bentuk hubungan fungsional dari variabel  $p$ ,  $V$ , dan  $T$  di atas atau bentuk variabel keadaannya ada dua macam, yaitu:

1)  $f(p, V, T) = 0$

Bentuk ini disebut bentuk implisit, yaitu bentuk variabel keadaan yang tersirat, dua variabel diantaranya adalah variabel bebas, sedangkan variabel yang satunya adalah variabel terikat.

2)  $p = p(V, T)$

Bentuk ini dinamakan bentuk eksplisit, dimana tampak bahwa variabel  $V$  dan  $T$  adalah variabel bebas, sedangkan variabel  $p$  adalah variabel terikat.

## 2. Bentuk Umum Turunan Parsial dan Turunan Total

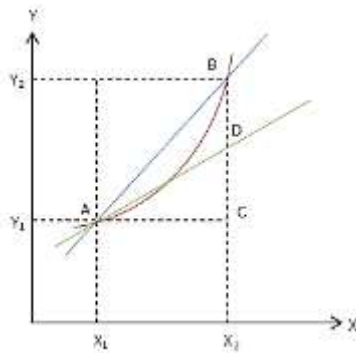
### a. Turunan fungsi variabel tunggal

Membahas mengenai turunan parsial dalam termodinamika tentu saja adalah membicarakan fungsi dengan dua variabel, tetapi sebelum itu terlebih dahulu mengulas sedikit fungsi variabel tunggal, agar anda lebih mudah memahami fungsi dengan dua variabel. Sebagaimana telah dibahas sebelumnya bahwa  $f(X, Y) = 0$  menyatakan hubungan implisit fungsi variabel  $x$  dan  $y$ . Bentuk  $f(X, Y) = 0$  disebut bentuk implisit, bentuk eksplisitnya adalah  $X = X(Y)$  dan  $Y = Y(X)$ . Bentuk  $X = X(Y)$  artinya  $y$  sebagai

variabel bebas, dan  $X$  sebagai variabel terikat. Sedangkan bentuk  $Y = Y(X)$  artinya  $X$  sebagai variabel bebas dan  $Y$  sebagai variabel tak bebas.

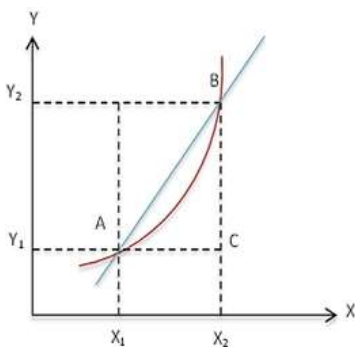
Pada termodinamika banyak membahas mengenai *proses*. Proses yang dimaksud adalah *perubahan dari koordinat-koordinat termodinamika*. Perubahan suatu koordinat termodinamika tertentudalam suatu sistem, akan berpengaruh terhadap koordinat termodinamika yang lain. Misalnya untukhubungan  $f(x,y) = 0$ , jika koordinat termodinamika  $x$  berubah sebesar 'dx', bagaimana cara menyatakan perubahan koordinat termodinamika  $y$ ?

Misalkan ada grafik fungsi  $Y=Y(X)$  seperti gambar, maka dapat dicari slope dari grafik tersebut.

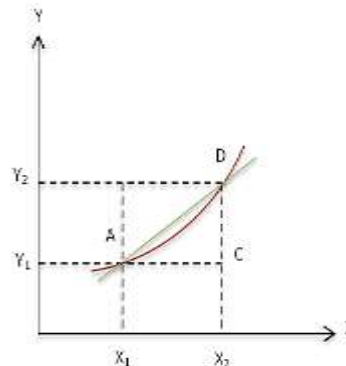


**Gambar 4.1.** Grafik fungsi  $Y=Y(X)$

untuk mempermudah kita dalam memahami grafik tersebut, kita buat dua grafik dengan dua keadaan berbeda. Perhatikan Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 berikut.



**Gambar 4.2.** Grafik fungsi  $Y=Y(X)$  mula-mula



**Gambar 4.3.** Grafik fungsi  $Y=Y(X)$  saat  $\Delta X$  mendekati nol

Pada saat  $X = X_1$  maka nilai fungsi  $Y_1 = Y(X_1)$

Pada saat  $X = X_2$  maka nilai fungsi  $Y_2 = Y(X_2)$

$AC = \Delta X = X_2 - X_1$  dan  $BC = \Delta Y = Y_2 - Y_1$

$\tan(\Delta BAC) =$  kemiringan tali busur AB

Slope/kemiringan grafik mula-mula adalah  $\frac{\Delta Y}{\Delta X}$ . Apabila kita buat  $X_2$  mendekati  $X_1$  atau dengan kata lain  $\Delta X$  mendekati nol, maka titik B akan mendekati titik A dan titik yang baru ini kita namakan titik D.  $\Delta Y$  disini sama dengan  $\Delta f$  maka kemiringan grafik tersebut berubah menjadi:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta X} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x+\Delta X) - f(x)}{\Delta X} \quad (4.1)$$

Persamaan di atas merupakan turunan pertama  $f(X)$  terhadap  $X$

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(x+\Delta X) - f(x)}{\Delta X} = \frac{d}{dx} f(X) = f'(X) = \frac{dY}{dX} \quad (4.2)$$

Selisih/perubahan kemiringan awal  $\frac{\Delta Y}{\Delta X}$  dengan kemiringan akhir  $\frac{dY}{dX}$  kita simbolkan  $n$ , sehingga:

$$\frac{\Delta Y}{\Delta X} - \frac{dY}{dX} = n \quad (4.3)$$

Jika perubahan ini sangat kecil ( $n = 0$ ) maka yang mula-mula  $\Delta Y$  berubah menjadi  $dY$ ,  $\Delta X$  berubah menjadi  $dX$ . Sedangkan yang mula-mula  $dY$  berubah menjadi  $\partial Y$  dan  $dX$  berubah menjadi  $\partial X$ . Sehingga dapat dituliskan

$$\frac{dY}{dX} - \frac{\partial Y}{\partial X} = 0 \quad (4.4)$$

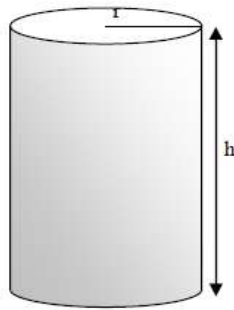
$$\frac{dY}{dX} = \frac{\partial Y}{\partial X} \quad (4.5)$$

$$dY = \frac{\partial Y}{\partial X} dX \quad (4.6)$$

Hal ini juga berlaku untuk  $dX$  yaitu  $dX = \frac{\partial X}{\partial Y} dY$ .

#### b. Diferensial fungsi dua variabel

Tinjau suatu bejana berbentuk silinder dengan jari-jari  $r$  dan ketinggian  $h$  seperti tampak pada gambar berikut:



Gambar 4.4.

Volume silinder tersebut adalah  $V = \pi r^2 h$ . Jadi dalam hal ini volume silinder ( $V$ ) bergantung pada dua variabel, yakni  $r$  dan  $h$ . Jika bejana silinder tersebut diisi dengan suatu fluida, maka jari-jari  $r$  kita jaga tetap dan ketinggian  $h$  bertambah, maka volume  $V$  akan bertambah. Dalam hal ini kita dapat mencari koefisien diferensial  $V$  terhadap  $h$ , hanya jika  $r$  dijaga tetap, yaitu  $\left(\frac{dV}{dh}\right)_{r \text{ konstan}}$  dan ditulis sebagai  $\frac{\partial V}{\partial h}$ . Untuk memperoleh  $\frac{\partial V}{\partial h}$ , terlebih dahulu mendefinisikan persamaan yang diberikan terhadap  $h$  dengan menganggap semua simbol, selain  $V$  dan  $h$  konstan, maka  $\left(\frac{dV}{dh}\right)_r = \pi r^2 \cdot 1 = \pi r^2$ . Tentu juga dapat meninjau persoalan dengan  $h$  dijaga konstan, perubahan  $r$  akan menyebabkan perubahan  $V$  juga, atau dalam bentuk  $\left(\frac{dV}{dr}\right)_h$  yang berarti mendiferensialkan  $V = \pi r^2 h$  terhadap  $r$  dengan menganggap semua simbol, selain  $V$  dan  $r$  konstan, maka  $\left(\frac{dV}{dr}\right)_h = 2\pi r h$ . Oleh karena itu persamaan  $V = \pi r^2 h$  dinyatakan sebagai fungsi dari dua variabel  $r$  dan  $h$ , sehingga memiliki dua koefisien diferensial parsial, yaitu:

$$\left(\frac{dV}{dh}\right)_r \text{ dan } \left(\frac{dV}{dr}\right)_h \quad (4.7)$$

Tentu saja kita tidak harus terbatas hanya pada variabel-variabel yang membangun volume silinder. Hal yang sama berlaku juga untuk sembarang fungsi dengan dua variabel bebas.

Sehingga untuk bentuk variabel keadaan  $Z = Z(X, Y)$  turunan/diferensial totalnya ialah:

$$dZ = \frac{\partial Z}{\partial X} dX + \frac{\partial Z}{\partial Y} dY \quad (4.8)$$

atau

$$dZ = \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y dX + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X dY \quad (4.9)$$

Arti fisis yang diperoleh pada diferensial parsial yakni:

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y dX = \text{perubahan } Z \text{ terhadap } X \text{ pada saat } Y \text{ tetap}$$

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X dY = \text{perubahan } Z \text{ terhadap } Y \text{ pada saat } X \text{ tetap}$$

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y \text{ dan } \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X \text{ inilah yang disebut turunan parsial}$$

Jika  $U$  mengandung sejumlah variabel  $U = f(X, Y, Z, \dots)$ , definisi berikut ini akan dipenuhi:

$$dU = \frac{\partial f}{\partial X} dX + \frac{\partial f}{\partial Y} dY + \frac{\partial f}{\partial Z} dZ + \dots \quad (4.10)$$

$du$  merupakan pendekatan yang baik dari  $\Delta U$  (perubahan  $U$ ) jika derivatif parsial dari  $f$  kontinu dan  $dx, dy, dz$  bernilai kecil. Jadi gabungan dari seluruh turunan parsial suatu fungsi merupakan diferensial total.

Pada bahasan sebelumnya sudah mengenal bentuk  $f(X, Y, Z) = 0$ . Ini adalah bentuk implisit dari fungsi dengan variabel  $X, Y$  dan  $Z$ . Pada fungsi  $f(X, Y, Z) = 0$  terdapat hubungan tertentu antara variabel  $X, Y$  dan  $Z$ . Fungsi  $f(X, Y, Z) = 0$  memiliki arti bahwa hanya terdapat 2 variabel diantara 3 variabel itu yang bersifat bebas, sedangkan yang ketiga merupakan variabel tak bebas. Sedangkan bentuk eksplisit dari fungsi tersebut adalah:

$$X = X(Y, Z); \text{ dimana } Y \text{ dan } Z \text{ merupakan variabel bebas}$$

$$Y = Y(X, Z); \text{ dimana } X \text{ dan } Z \text{ merupakan variabel bebas}$$

$$Z = Z(X, Y); \text{ dimana } X \text{ dan } Y \text{ merupakan variabel bebas}$$

Diferensial parsial berfungsi untuk menentukan perubahan total suatu variabel akibat perubahan variabel lainnya. Dalam termodinamika terdapat proses yang mengakibatkan perubahan variabel. Perubahan variabel ini kemudian diselesaikan dengan diferensial/ turunan parsial. Dari persamaan keadaan  $f(A, B, C) = 0$ , ada 6 buah diferensial parsial yang mungkin dibuat.

## B. Turunan Parsial dalam Termodinamika

### 1. Turunan Parsial

Persamaan keadaan suatu sistem  $p$ - $v$ - $T$ , misalnya untuk sistem yang terdiri atas satu mol gas, secara umum adalah

$$f(p, v, T) = 0 \quad (4.11)$$

karena variabel-variabel itu dihubungkan oleh satu persamaan, maka hanya dua dari tiga variabel tersebut adalah variabel bebas (tak terikat) dan yang ketiga adalah variabel tak bebas (terikat). Jika dua dari ketiga variabel itu diketahui maka yang ketiga dapat dihitung. Satu variabel merupakan fungsi dari dua variabel yang lain. Jadi dapat dipilih

$$p = f(v, T) ; v = f(p, T) ; T = f(p, v) \quad (4.12)$$

Secara umum, untuk sembarang sistem, hubungan ketiga variabel itu

$$f(X, Y, Z) = 0 \quad (4.13)$$

misalkan dipilih:  $Z = f(X, Y)$  atau  $Z = Z(X, Y)$ . Menurut matematika

$$dZ = \frac{\partial f}{\partial X} dX + \frac{\partial f}{\partial Y} dY \quad (4.14)$$

atau

$$dZ = \frac{\partial Z}{\partial X} dX + \frac{\partial Z}{\partial Y} dY \quad (4.15)$$

$\frac{\partial f}{\partial X}$  atau  $\frac{\partial Z}{\partial X}$  mempunyai arti bahwa fungsi tersebut diturunkan terhadap  $X$  dengan menganggap  $Y$  sebagai tetapan, dan  $\frac{\partial f}{\partial Y}$  atau  $\frac{\partial Z}{\partial Y}$  berarti bahwa fungsi itu diturunkan terhadap  $Y$  dengan menganggap  $X$  sebagai tetapan. Cara penulisan seperti yang tertera pada Persamaan (4.14) dan (4.15) adalah cara yang biasa digunakan dalam bidang matematika. Dalam termodinamika cara penulisannya agak berbeda, yaitu bahwa variabel yang dianggap sebagai tetapan dicantumkan sebagai indeks.

Jadi

$$dZ = \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)_Y dX + \left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)_X dY \quad (4.16)$$

atau

$$dZ = \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y dX + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X dY \quad (4.17)$$

Tentu saja  $X$  dapat dianggap sebagai fungsi  $Y$  dan  $Z$ , sehingga

$$dX = \left(\frac{\partial X}{\partial Y}\right)_Z dY + \left(\frac{\partial X}{\partial Z}\right)_Y dZ \quad (4.18)$$

Jika Persamaan (4.18) dimasukkan ke dalam Persamaan (4.17) diperoleh

$$dZ = \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y \left[\left(\frac{\partial X}{\partial Y}\right)_Z dY + \left(\frac{\partial X}{\partial Z}\right)_Y dZ\right] + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X dY$$

yang dapat disusun menjadi

$$\left[1 - \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y \left(\frac{\partial X}{\partial Z}\right)_Y\right] dZ = \left[\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y \left(\frac{\partial X}{\partial Y}\right)_Z + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X\right] dY \quad (A)$$

dalam Persamaan (A) ini sebagai variabel bebas adalah  $Y$  dan  $Z$ , karena itu boleh diberi nilai atau diberi perubahan nilai berapapun. Jika  $dY = 0$  dan  $dZ \neq 0$ , maka ruas kanan menjadi nol sehingga ruas kiripun harus sama dengan nol, sebab ini adalah suatu persamaan. Tetapi  $dZ \neq 0$ , jadi faktor dalam kurung di ruas kiri haruslah sama dengan nol, sehingga

$$\left[1 - \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y \left(\frac{\partial X}{\partial Z}\right)_Y\right] = 0$$

atau

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y \left(\frac{\partial X}{\partial Z}\right)_Y = 1$$

atau

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y = \frac{1}{\left(\frac{\partial X}{\partial Z}\right)_Y} \quad (4.19)$$

Jika dari Persamaan (A) diatas  $dZ = 0$  dan  $dY \neq 0$ , maka ruas kiri = 0 sehingga ruas kananpun harus = 0. Tetapi karena  $dY \neq 0$  maka

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y \left(\frac{\partial X}{\partial Y}\right)_Z + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X = 0$$

atau

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y \left(\frac{\partial X}{\partial Y}\right)_Z = -\left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X = -\frac{1}{\left(\frac{\partial Y}{\partial Z}\right)_X}$$

atau

$$\left(\frac{\partial X}{\partial Y}\right)_Z \left(\frac{\partial Y}{\partial Z}\right)_X \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y = -1 \quad (4.20)$$

Rumus (4.20) sering dinamakan sebagai “rumus - 1”. Rumus ini dapat pula diubah menjadi

$$\left(\frac{\partial X}{\partial Y}\right)_Z = -\frac{1}{\left(\frac{\partial Y}{\partial Z}\right)_X \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y}$$

dengan Rumus (4.19), maka persamaan di atas diubah lagi menjadi

$$\left(\frac{\partial X}{\partial Y}\right)_Z = -\frac{\left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X}{\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y} \quad (4.21)$$

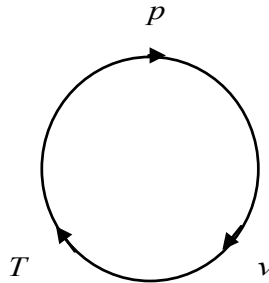
Rumus-rumus (4.19) sampai dengan (4.21) dapat diterapkan pada sistem  $p$ - $v$ - $T$ , seperti persamaan keadaan gas sempurna ataupun gas Van der Waals. Jadi

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = \frac{1}{\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T} \quad (4.22)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v = -1 \quad (4.23)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = -\frac{\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p}{\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v} \quad (4.24)$$

Rumus (4.22) mudah diingat bila dianalogikan misalnya dengan bilangan  $2/3$  yang sama dengan  $\frac{1}{3/2}$ . Sementara itu sementara itu tampaknya Rumus (4.23) lebih sulit untuk diingat. Namun dengan membayangkan bahwa ketiga variabel  $p$ ,  $v$ , dan  $T$  sebagai tiga titik yang terletak pada sebuah lingkaran dengan jarak yang sama (Gambar 4.5), maka rumus itu mudah dituliskan.



**Gambar 4.5.** Model siklus  $p$ - $v$ - $T$

Jika faktor pertama dalam kurung adalah  $\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T$ , maka letakkanlah  $p$  di puncak,  $v$  di sebelah kanan bawah dan  $T$  di sebelah kiri bawah. Untuk memperoleh faktor kedua, putarlah lingkaran itu sekeliling sumbu sumbu di pusatnya sesuai dengan arah perputaran jarum jam, sehingga  $v$  di puncak,  $T$  di kanan bawah dan  $p$  di kiri bawah sehingga faktor kedua menjadi  $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$ . Selanjutnya untuk memperoleh faktor ketiga, lingkaran diputar lagi sesuai dengan arah perputaran jarum jam, sehingga  $T$  di atas,  $p$



disebelah kanan bawah dan  $v$  di sebelah kirik bawah sehingga faktor ketiga menjadi  $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v$ . Maka lengkap menjadi Persamaan  $\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v = -1$ .

Untuk menuliskan Rumus (4.24), perlu diingat bahwa turunan parsial itu dipecah menjadi dua buah turunan parsial, yang pertama sebagai pembilang (numerator) dan yang kedua sebagai penyebut (denominator). Yang diturunkan (didiferensialkan) baik pada pembilang ataupun penyebut adalah variabel yang diluar kurung atau yang dianggap sebagai tetapan pada ruas kiri. Dalam Rumus (4.24) variabel yang diluar kurung adalah  $T$ . Kemudian didiferensialkan  $T$  terhadap dua variabel lain diruas kiri secara bersilang. Jadi untuk pembilang  $T$  didiferensialkan terhadap  $v$  dan untuk penyebut  $T$  didiferensialkan terhadap  $p$ .

Dengan mengingat cara-cara seperti tersebut di atas itu maka variasi ketiga rumus itu mudah dibuat. Misalnya

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{1}{\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v} \quad (4.22a)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = -1 \quad (4.23a)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = -\frac{\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p}{\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T} \quad (4.24a)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = \frac{1}{\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T} \quad (4.22b)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p = -1 \quad (4.23b)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = -\frac{\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v}{\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p} \quad (4.24b)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p = \frac{1}{\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p} \quad (4.22c)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = -1 \quad (4.23c)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p = -\frac{\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T}{\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v} \quad (4.24c)$$

Dalam termodinamika ketergantungan suatu variabel tertentu pada variabel-variabel tak terikat yang lain seringkali tak dapat dikatakan secara eksplisit. Contoh yang jelas ialah

variabel  $v$  (volume) pada persamaan Van der Waals tak dapat dibuat eksplisit. Untuk menghitung turunan parsial dari variabel ini harus digunakan rumus seperti (4.22) atau (4.24). Namun timbul pertanyaan bagaimana jika secara umum ketiga variabel itu tak dapat dibuat menjadi eksplisit?. Kedua rumus di atas jelas tak dapat digunakan. Terdapat cara lain untuk menyelesaikan persoalan seperti ini, bahkan untuk variabel yang lebih dari tiga. Akan tetapi dalam subbab ini pembahasan akan dibatasi sampai tiga variabel saja.

Misalkan secara umum:  $f(X, Y, Z) = 0$ , bila didiferensialkan

$$df = \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)_{Y,Z} dX + \left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)_{Z,X} dY + \left(\frac{\partial f}{\partial Z}\right)_{X,Y} dZ = 0$$

Jika  $Z$  tidak berubah atau  $dZ=0$

$$df = \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)_{Y,Z} dX = - \left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)_{Z,X} dY$$

atau

$$\left(\frac{\partial Y}{\partial X}\right)_Z = - \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)_{Y,Z}}{\left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)_{Z,X}} \quad (4.25a)$$

analog

$$\left(\frac{\partial X}{\partial Z}\right)_Y = - \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial Z}\right)_{X,Y}}{\left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)_{Y,Z}} \quad (4.25b)$$

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X = - \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)_{Z,X}}{\left(\frac{\partial f}{\partial Z}\right)_{X,Y}} \quad (4.25c)$$

Jika diterapkan pada sistem  $f(p, v, T) = 0$ , diperoleh

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = - \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial v}\right)_{T,p}}{\left(\frac{\partial f}{\partial p}\right)_{v,T}} \quad (4.26a)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = - \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)_{p,v}}{\left(\frac{\partial f}{\partial v}\right)_{T,p}} \quad (4.26b)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v = - \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial p}\right)_{v,T}}{\left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)_{p,v}} \quad (4.26c)$$

## 2. Penerapan Turunan Parsial pada Sistem Termodinamika

Rumus-rumus di atas dapat diterapkan pada sistem termodinamika dan sementara itu dapat pula diuji kebenaran rumus-rumus tersebut. Misalnya untuk gas sempurna yang persamaan keadaannya:  $p v = RT$ .

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = -\frac{RT}{v^2} = -\frac{p}{v} \quad (\text{A})$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = -\frac{RT}{p^2} = -\frac{v}{p} \quad (\text{B})$$

Tampaklah bahwa Persamaan (B) adalah kebalikan dari Persamaan (A), sesuai dengan Rumus (4.22). Rumus (4.23) dapat pula diuji kebenarannya dengan cara sebagai berikut.

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = -\frac{RT}{v^2} = -\frac{p}{v}; \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p}; \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v = \frac{v}{R}$$

Apabila ketiganya satu dengan yang lain hasilnya sama dengan -1, sesuai dengan Rumus (4.23). Dengan cara yang sama dapat pula diuji kebenaran Rumus (4.24).

Rumus (4.24) sangat berguna untuk menghitung turunan parsial suatu variabel yang dari persamaannya tak dapat dibuat eksplisit. Misalkan variabel  $v$  di dalam persamaan keadaan gas Van der Waals. Sesuai dengan Rumus (4.24), maka untuk menghitung  $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$  perlu dihitung  $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v$  dan  $\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T$ . Persamaan Van der Waals dapat diubah menjadi

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v-b}; \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = -\frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^3}$$

Jadi

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = -\frac{\frac{R}{v-b}}{-\left(\frac{RT}{(v-b)^2}\right) + \left(\frac{2a}{v^3}\right)} = \frac{R(v-b)v^3}{RTv^3 - 2a(v-b)^2}$$

akan tetapi soal ini dapat pula diselesaikan dengan menggunakan Rumus (4.26b), yang lebih bersifat umum daripada Rumus (4.24), sebab variabel itu boleh eksplisit boleh pula tidak. Secara lebih umum persamaan gas Van der Waals dapat ditulis sebagai berikut

$$f(p, v, T) = 0$$

atau

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) - RT = 0$$

dan sesuai dengan Rumus (4.26b), maka

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = -\frac{\left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)_{p,v}}{\left(\frac{\partial f}{\partial v}\right)_{p,T}} = -\frac{-R}{(p+a/v^2) + (v-b)(-2a/v^3)}$$

yang kalau disederhanakan juga menjadi

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R(v-b)v^3}{RTv^3 - 2a(v-b)^2}$$

### 3. Koefisien Muai Kubik dan Ketermampatan Isotermal

Sudah merupakan suatu keperluan, bahwa dalam fisika kita sering mewakili sifat suatu bahan dengan suatu koefisien tertentu. Untuk menyatakan mudah tidaknya suatu bahan untuk memuai, digunakan suatu koefisien yang disebut *koefisien muai kubik*, yang dilambangkan dengan huruf  $\beta$ . Jika kita hanya berbicara pemuaian pada tekanan konstan, maka koefisien muainya disebut *koefisien muai kubik isobarik* suatu zat, yang didefinisikan sebagai,

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \quad (4.27)$$

atau

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \quad (4.28)$$

Variabel  $V$  dalam Rumus (4.27) adalah volume total, sedang  $v$  dalam Rumus (4.28) adalah volume jenis, yaitu volume per kg atau volume per mol.  $\partial V$  atau  $\partial v$  adalah perubahan volume zat disebabkan karena suhunya berubah dengan  $\partial T$ . Untuk gas sempurna  $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p}$ , sehingga

$$\beta = \frac{1}{v} \frac{R}{p} = \frac{1}{T}$$

Untuk gas Van der Waals,

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{1}{v} \frac{R v^3 (v-b)}{RT v^3 - 2a (v-b)^2} \quad (4.29)$$

atau

$$\beta = \frac{R v^2 (v-b)}{RT v^3 - 2a (v-b)^2} \quad (4.30)$$

Dari definisi diatas, jelaslah bahwa satuan  $\beta$  adalah  $K^{-1}$ . Bila suatu zat memiliki koefisien muai kubik  $2,0 \times 10^{-3} K^{-1}$ , maka secara fisis dapat dijelaskan sebagai berikut: *Jika kita memiliki 1 m<sup>3</sup> zat tersebut, kemudian suhunya dinaikkan 1 K, maka volumenya akan bertambah sebesar  $2,0 \times 10^{-3} m^3$ , bila tekanan konstan.*

Ditinjau suatu sistem menjalani proses isobarik yang kecil, artinya keadaan akhir hanya menyimpang sedikit dari keadaan awal. Misalkan keadaan awal ditentukan oleh suhu  $T$  dan volume  $V$  dan keadaan akhir ditentukan oleh suhu  $T + dT$  dan volume  $V + dV$ , keduanya pada tekanan yang sama. Koefisien muai volume dapat ditulis sebagai

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{dV_p}{dT_p} = \frac{dV_p/V}{dT_p} \quad (4.31)$$

atau

$$\beta = \frac{1}{v} \frac{dv_p}{dT_p} = \frac{dv_p/v}{dT_p} \quad (4.32)$$

Jadi koefisien muai volume dapat dinyatakan sebagai nilai limit dari perubahan volume fraksional  $dV_p/V$  atau  $dv_p/v$  per satuan perubahan suhu pada tekanan tetap. Koefisien muai volume rata-rata  $\bar{\beta}$  di dalam selang suhu tertentu antara  $T_1$  dan  $T_2$  didefinisikan sebagai

$$\bar{\beta} = \frac{(V_2 - V_1)/V_1}{T_2 - T_1} = \frac{1}{V_1} \frac{\Delta V_p}{\Delta T_p} \quad (4.33)$$

Pada umumnya koefisien muai volume adalah fungsi suhu dan tekanan. Ternyata koefisien ini mendekati nol ketika suhunya mendekati 0 K. Hal ini telah diperlihatkan oleh beberapa logam seperti tembaga dan lain-lain. Juga telah diketahui bahwa koefisien muai volume untuk merkuri berubah dengan tekanan pada suhu tetap 0°C. Namun perubahan ini hanya kecil saja walaupun tekanan diperbesar hingga 7000 atm.

Pada suhu 4°C air mempunyai rapat atau massa jenis maksimum dan volume jenis minimum. Dalam selang suhu antara 0°C dan 4°C volume jenisnya menurun dengan kenaikan suhu. Sehingga koefisien muai volume adalah negatif dan pada 4°C adalah nol. Tabel tentang sifat-sifat zat biasanya mencantumkan juga koefisien linear  $\alpha$  zat padat yang dihubungkan dengan  $\beta$  oleh persamaan

$$\beta = 3\alpha \quad (4.34)$$

Hal ini akan diperlihatkan pada Contoh 4.4. Nilai dalam tabel tersebut biasanya adalah nilai rata-rata dalam selang suhu dekat suhu kamar dan tekanan atmosfer. Dari uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa yang dimaksud dengan koefisien muai kubik adalah perubahan volume terhadap kenaikan temperatur persatuan volume pada tekanan tetap.

Selain koefisien muai volume, juga ada keternampatan yang menerapkan turunan parsial. Katernampatan didefinisikan sebagai perubahan relatif volume apabila tekanan diubah dan temperaturnya diusahakan tetap. Katernampatan isotermal  $\mathcal{K}$  suatu zat didefinisikan sebagai,

$$\mathcal{K} = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (4.35)$$

atau

$$\mathcal{K} = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \quad (4.36)$$

Tanda negatif diberikan di sini mengingat bahwa volume selalu berkurang dengan kenaikan tekanan. Jadi  $\left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$  negatif sehingga  $\mathcal{K}$  menjadi positif. Satuan  $\mathcal{K}$  dalam sistem SI adalah  $\text{Pa}^{-1}$  atau  $\text{m}^2/\text{N}$ . Untuk gas sempurna  $pV=RT$  atau  $v = \frac{RT}{p}$ . Jadi

$$\left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = -\frac{RT}{p^2}$$

atau

$$\mathcal{K} = -\frac{1}{V} \left( -\frac{RT}{p^2} \right) = \frac{1}{p} \quad (4.37)$$

katernampatan rata-rata didefinisikan sebagai

$$\overline{\mathcal{K}} = -\frac{1}{v} \frac{\Delta v_T}{\Delta p_T} \quad (4.38)$$

Untuk gas Van Der Waals,  $\mathcal{K}$  juga dapat ditentukan dengan mudah. Karena  $v$  tak dapat dibuat eksplisit, maka untuk menghitungnya perlu digunakan Rumus (4.22) atau (4.24) atau rumus yang lebih umum yaitu Rumus (4.26b). Hasilnya ialah

$$\mathcal{K} = \frac{v^2(v-b)^2}{RTv^3 - 2a(v-b)^2} \quad (4.39)$$

Untuk zat cair dan zat padat,  $\beta$  dan  $\mathcal{K}$  tak dapat ditentukan dari persamaan keadaannya, tetapi harus dengan eksperimen. Ternyata pula bahwa keduanya adalah fungsi dari tekanan dan suhu. Jadi

$$\beta = \beta(p, T)$$

$$\mathcal{K} = \mathcal{K}(p, T)$$

Ditinjau suatu system  $p$ - $V$ - $T$  dan dipilih  $V = V(p, T)$ . Jika didiferensialkan diperoleh

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T dp \quad (4.40)$$

atau

$$dV = \beta V dT - \mathcal{K} V dp \quad (4.41)$$

Jika  $\beta$  dan  $\kappa$  telah diketahui dari hasil eksperimen dan diketahui pula sebagai fungsi suhu dan tekanan, maka persamaan keadaannya dapat ditentukan dengan pengintegralan. Misalkan untuk gas pada tekanan rendah telah diketemukan  $\beta = \frac{1}{T}$  dan  $\mathcal{K} = \frac{1}{p}$ . Jika dimasukkan pada Persamaan (4.41) diperoleh

$$dV = V \frac{dT}{T} - V \frac{dp}{p}$$

atau

$$\frac{dV}{V} - \frac{dT}{T} + \frac{dp}{p} = 0$$

Jika persamaan yang terakhir ini diintegrasikan, akan diperoleh

$$\ln V - \ln T + \ln p = \ln C$$

$$\frac{pV}{T} = C$$

Jika tetapan itu diketahui sama dengan  $nR$ , maka persamaan itu adalah persamaan keadaan gas sempurna. Jika Persamaan (4.41) diintegrasikan dari suatu keadaan ( $p_o, V_o, T_o$ ) ke keadaan lain ( $p, V, T$ ), maka diperoleh

$$\int_{V_o}^V dV = V - V_o = \int_{T_o}^T \beta V dT - \int_{p_o}^p \mathcal{K} V dp$$

Perubahan volume zat cair dan zat padat adalah kecil bila suhu dan tekanan berubah, karena itu secara pendekatan  $V$  dapat dianggap tetap dan sama dengan  $V_o$ . Sementara  $\beta$  dan  $\mathcal{K}$  adalah bilangan kecil dan juga dapat dianggap tetap, sehingga hasil integral persamaan di atas adalah

$$V = V_o[1 + \beta(T - T_o) - \mathcal{K}(p - p_o)] \quad (4.42)$$

Jadi dengan mengukur  $\beta$  dan  $\kappa$  ditambah dengan apa yang diketahui tentang nilai  $p_o, V_o$ , dan  $T_o$  pada keadaan acuan, maka cukuplah untuk menentukan persamaan keadaan zat cair dan padat secara pendekatan.

#### 4. Diferensial Eksak

Andaikan dari variable-variabel  $X$ ,  $Y$ , dan  $Z$  terdapat hubungan  $Z = f(X, Y)$ , sehingga dapat diturunkan

$$dZ = \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y dX + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X dY$$

atau

$$dZ = M(X, Y)dX + N(X, Y)dY$$

dengan

$$M(X, Y) = \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y; N(X, Y) = \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X$$

maka apabila  $Z$  dan juga turunan-turunannya kontinu lagi pula dipenuhi hubungan

$$\left(\frac{\partial M}{\partial Y}\right)_X = \left(\frac{\partial N}{\partial X}\right)_Y \quad (4.43)$$

$dZ$  disebut diferensial eksak.

Agar pembahasan ini lebih bersifat umum, yaitu meliputi lebih dari tiga variabel, maka fungsi yang akan ditinjau adalah

$$f(X, Y, Z, U, V, W, \dots) = 0 \quad (4.44)$$

Dari hubungan ini dapat dipilih misalnya

$$W = W(X, Y, Z, U, V, \dots) \quad (4.45)$$

Bila didiferensialkan maka hasilnya adalah

$$dW = \left(\frac{\partial W}{\partial X}\right)_{Y,Z,\dots} dX + \left(\frac{\partial W}{\partial Y}\right)_{X,Z,\dots} dY + \dots \quad (4.46)$$

atau

$$dW = M dX + N dY + P dZ + \dots \quad (4.47)$$

Bila  $W$  demikian pula turunan-turunannya kontinu, lagi pula dipenuhi hubungan

$$\left(\frac{\partial M}{\partial Y}\right)_{X,Z,\dots} = \left(\frac{\partial N}{\partial X}\right)_{Y,Z,\dots}; \left(\frac{\partial M}{\partial Z}\right)_{X,Y,\dots} = \left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)_{Y,Z,\dots}; \left(\frac{\partial N}{\partial Z}\right)_{X,Y,\dots} = \left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)_{X,Z,\dots} \text{ dan seterusnya.}$$

Maka  $dW$  disebut diferensial eksak. Selanjutnya

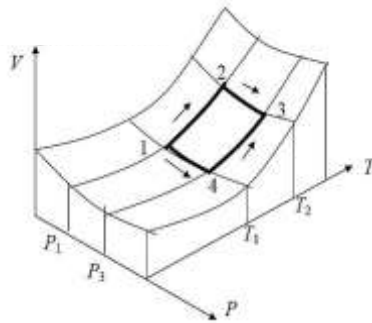
$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial M}{\partial Y}\right)_{X,Z,\dots} &= \frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{\partial W}{\partial X}\right)_{Z,U,\dots} = \left(\frac{\partial^2 W}{\partial Y \partial X}\right)_{Z,U,\dots} \\ \left(\frac{\partial N}{\partial X}\right)_{Y,Z,\dots} &= \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\partial W}{\partial Y}\right)_{X,Z,\dots} = \left(\frac{\partial^2 W}{\partial X \partial Y}\right)_{Z,U,\dots} \end{aligned}$$

Jadi

$$\left(\frac{\partial^2 W}{\partial Y \partial X}\right)_{Z,U,\dots} = \left(\frac{\partial^2 W}{\partial X \partial Y}\right)_{Z,U,\dots} \quad (4.48)$$



Ini berarti bahwa nilai turunan parsial kedua campuran tidak tergantung pada urutan pendiferensialan. Dalam matematika diketahui bahwa jika suatu diferensial eksak diintegrasikan, maka hasilnya hanya tergantung pada batas integral awal dan akhir saja, tidak tergantung pada jalan yang dilalui. Oleh karena itu apabila diintegrasikan melalui lintasan yang tertutup (keadaan akhir kembali ke keadaan awal), maka hasilnya sama dengan nol. Perhatikan Gambar 4.6 sebagai geometris dari diferensial eksak dari volume,



**Gambar 4.6.** Proses isobarik, isohorik, dan isothermal pada grafik  $p, V, T$

Dari Gambar 4.6, pada proses sepanjang jejak 1-2-3:

$$dV_{1-2-3} = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p_1} dT + \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_{T_2} dp$$

Sepanjang jejak 1-4-3:

$$dV_{1-4-3} = \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_{T_1} dp + \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p_3} dT$$

karena perubahan volume ini sama, maka:

$$\frac{\left[\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p_3} - \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p_1}\right]}{dp} = \frac{\left[\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_{T_2} - \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_{T_1}\right]}{dT}$$

Apabila  $dp$  dan  $dT$  mendekati nol maka terjadi turunan dua tahap:

- ◆ Perhatikan suku sebelah kiri diturunkan ke  $T$  dahulu, lalu ke  $p$
- ◆ Perhatikan suku sebelah kanan diturunkan ke  $p$  dahulu, lalu ke  $T$

terlihat dengan mudah bahwa:

$$\left[\frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p\right]_T = \left[\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T\right]_p$$

atau

$$\frac{\partial^2 V}{\partial p \partial T} = \frac{\partial^2 V}{\partial T \partial p}$$

Pada termodinamika variabel-variabel seperti  $p, V$ , dan  $T$  adalah fungsi keadaan. Nilainya ditentukan oleh keadaan sistem. Pada tiap keadaan setimbang ketiga variable itu mempunyai nilai tertentu. Diferensialnya adalah diferensial eksak. Sebab kalau diintegalkan hasilnya hanya ditentukan oleh keadaan awal dan keadaan akhir saja. Kecuali besaran keadaan atau fungsi keadaan, di dalam termodinamika terdapat pula besaran yang bukan fungsi keadaan, misalnya kalor yang akan diberi lambang  $Q$  dan juga besaran kerja/ usaha yang akan di beri lambang  $W$ . dalam suatu sistem yang seimbang tak dapat ditanyakan berapa nilai  $Q$  dan  $W$  nya. Pengertian kedua besaran tersebut hanya timbul pada suatu proses atau perubahan sistem dari satu keadaan ke keadaan yang lain. Diferensialnya bukan diferensial eksak, sebab kalau diintegalkan nilainya tergantung juga pada jalan yang dilalui. Dengan perkataan lain nilainya tergantung pada jenis prosesnya. Lambang  $dQ$  dan  $dW$  bukan berarti diferensial dari fungsi  $Q$  dan  $W$ , melainkan hanyalah sejumlah kecil kalor dan sejumlah kecil kerja yang diperlukan atau yang timbul pada suatu proses tak terhingga kecil.

Untuk membedakan kedua jenis diferensial ini, akan digunakan lambang  $d$  untuk diferensial eksak dan  $\delta$  untuk diferensial tidak eksak. Misalnya  $dp, dv, dT, \delta Q, \delta W$ . Suatu diferensial eksak kalau diintegalkan melalui lintasan yang tertutup, atau yang berkaitan dengan proses siklis, yaitu proses dengan keadaan akhir kembali ke atau berimpit dengan keadaan awal, maka hasilnya sama dengan nol.

Jadi

$$\oint dp = 0; \oint dV = 0; \oint dT = 0 \quad (4.49)$$

namun tidak demikian dengan diferensial non-eksak, misalnya

$$\oint \delta Q \neq 0; \oint \delta W \neq 0 \quad (4.50)$$

Apabila fungsi itu lebih sederhana, misalnya hanya terdiri atas dua variabel tak terikat saja maka hubungan yang diperoleh juga lebih sederhana. Misalnya kalau  $f(X, Y, Z) = 0$  dan  $Z = Z(X, Y)$  maka

$$dZ = \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y dX + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X dY \quad (4.51)$$

atau

$$dZ = M(X, Y)dX + N(X, Y)dY \quad (4.52)$$

Sehingga persyaratan agar  $dZ$  eksak adalah

$$\left(\frac{\partial M}{\partial Y}\right)_X = \left(\frac{\partial N}{\partial X}\right)_Y \quad (4.53)$$

Suatu diferensial takeksak, apabila dibagi dengan suatu fungsi dari salah satu variabel tak terikat atau yang sering disebut penyebut pengintegrasi (*integrating denominator*), dapat berubah menjadi diferensial eksak. Sebagai contoh  $dZ = Y dX - X dY$  adalah diferensial takeksak, sebab  $\left(\frac{\partial Y}{\partial Y}\right)_X \neq -\left(\frac{\partial X}{\partial X}\right)_Y$  atau  $1 \neq -1$ . Tetapi bila  $dZ$  dibagi dengan  $X^2$  sebagai *integrating denominator*, maka hasilnya (namakan  $dW$ ) menjadi diferensial eksak. Jadi  $\frac{dZ}{X^2} = dW = \frac{Y}{X^2} dX - \frac{1}{X} dY$  maka  $dY$  adalah diferensial eksak, sebab bila diterapkan persyaratan seperti pada Persamaan (4.53), hasilnya adalah  $\frac{1}{X^2} = \frac{1}{X^2}$ . Apabila  $dZ = Y dX + X dY$ , maka diferensial ini adalah eksak pula.

## 5. Hubungan Lain Turunan Parsial

Telah diketahui bahwa energi dalam  $u$  adalah fungsi keadaan, dan untuk gas variabel yang menentukan keadaan sistem adalah  $p$ ,  $v$  dan  $T$ . Secara umum misalkan variabel keadaan itu  $x$ ,  $y$  dan  $z$ . Jadi  $u = u(x, y, z)$ . Tetapi karena variabel-variabel itu dihubungkan oleh satu persamaan, yaitu persamaan keadaan, maka hanya dua variabel saja yang tak terikat. Dapat kita lihat misalnya  $u = u(x, y)$ .

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_y dx + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_x dy \quad (4.54)$$

Tetapi  $x$  adalah fungsi  $y$  dan  $z$ , sehingga perubahan  $x$  adalah

$$dx = \left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z dy + \left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)_y dz \quad (4.55)$$

Masukkan Persamaan (4.55) ke dalam Persamaan (4.54) kita akan memperoleh

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_y \left[ \left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z dy + \left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)_y dz \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_x dy$$

atau

$$du = \left[ \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_y \left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_x \right] dy + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_y \left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)_y dz$$

Tetapi sebagai fungsi  $y$  dan  $z$ , maka perubahan  $u$  adalah juga

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_x dy + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_y dz$$

Kedua persamaan yang terakhir ini adalah identik sehingga

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_y = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_y \left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)_y \quad (4.56)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_z = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_y \left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_x \quad (4.57)$$

Rumus (4.56) mudah diingat bila dianalogikan dengan misalnya bilangan  $5/3$  yang sama dengan  $(5/2)(2/3)$ , jadi pembilang dan penyebut dibagi dengan bilangan yang sama, sementara itu variabel yang dianggap konstan tetap saja (dalam rumus ialah  $y$ ). Rumus (4.57) lebih sulit untuk diingat. Pada ruas kanan terdapat dua suku, dengan suku pertama terdiri atas dua faktor dalam kurung dan suku kedua terdiri atas satu faktor saja dalam kurung. Dua faktor yang terdapat pada suku pertama sama seperti Rumus (4.56) tetap variabel yang dianggap tetap diambilkan dari apa yang tertulis di bawah garis pembagi pada ruas kiri ( $y$  dan  $z$ ). Suku kedua sama seperti ruas kiri, tetapi variabel yang dianggap tetap adalah variabel yang belum terpakai ( $x$ ).

Bila diterapkan dalam sistem  $p$ - $v$ - $T$ , akan diperoleh

$$\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v \quad (4.56a)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v + \left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T \quad (4.57a)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T \quad (4.56b)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_v \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_p \quad (4.57b)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_p \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \quad (4.56c)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p + \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \quad (4.57c)$$

### C. Contoh Soal



Contoh

4.1

(a) Buktikanlah bahwa  $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{\beta}{\mathcal{K}}$ . Ujilah kebenaran pernyataan di (a) dengan menerapkannya pada (b) gas sempurna dan (c) gas Van der Waals.

#### Penyelesaian

*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

(a) Dari rumus yang telah dibicarakan di atas,

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = -\frac{\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p}{\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T} = -\frac{\beta v}{-\mathcal{K}v} = \frac{\beta}{\mathcal{K}}$$

(b) Telah di dapatkan untuk gas sempurna,  $\beta = \frac{1}{T}$  dan  $\mathcal{K} = \frac{1}{p}$ . Jadi  $\frac{\beta}{\mathcal{K}} = \frac{p}{T}$ .

Sementara itu  $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v}$  yang tentu saja sama dengan  $\frac{p}{T}$ . Jadi pernyataan di (a) benar untuk gas sempurna.

(c) Untuk gas Vander Waals,

$$\beta = \frac{Rv^2(v-b)}{RTv^3-2a(v-b)^2} \quad \text{dan} \quad \mathcal{K} = \frac{v^2(v-b)^2}{RTv^3-2a(v-b)^2}$$

jadi

$$\frac{\beta}{\mathcal{K}} = \frac{R}{(v-b)}$$

Persamaan Van der Waals dapat diubah menjadi

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2} \quad \text{sehingga} \quad \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{(v-b)}$$

(a) pun benar untuk gas van der waals.

Periksa Kembali



Contoh

4.2

Carilah untuk gas Van der Waals: (a)  $\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T$ , (b)  $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$  dengan menggunakan hasil yang diperoleh dari  $\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p$ , (c)  $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v$ , (d) ujilah kebenaran rumus -1 dengan menghitung hasil kali (a), (b), dan (c) soal ini.

### Penyelesaian

*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Persamaan Van der Waals dapat ditulis:  $p = \frac{RT}{(v-b)} - \frac{a}{v^2}$ , jadi

$$(a) \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = -\frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^3} = \frac{2a(v-b)^2 - RTv^3}{v^3(v-b)^2}$$

$$(b) \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p = \frac{1}{R} \left[ \left(p + \frac{a}{v^2}\right) \cdot \frac{2a(v-b)}{v^3} \right] = \frac{1}{R} \left[ \frac{RT}{(v-b)} - \frac{2a(v-b)}{v^3} \right] = \frac{1}{R} \left[ \frac{RTv^3 - 2a(v-b)^2}{v^3(v-b)} \right]$$



jadi,

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{Rv^3(v-b)^2}{RTv^3 - 2a(v-b)^2}$$

$$(c) \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v = \frac{v-b}{R}$$

(d) Perkalian ketiga hasil ini

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v = \frac{2a(v-b)^2 - RTv^3}{v^3(v-b)^2} \frac{Rv^3(v-b)}{RTv^3 - 2a(v-b)^2} \frac{v-b}{R} = -1$$

Periksa  
Kembali



Contoh

4.3

Bila volume  $v$  adalah salah satu variabel didalam sistem  $p$ - $v$ - $T$  gas sempurna, buktikanlah bahwa integral  $dv$  dari keadaan A ke keadaan B melalui dua jalan yang berbeda (A-B) dan (A-C-B) memberikan hasil yang sama. Lihat gambar dibawah ini.



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Persamaan keadaan gas sempurna  $pv = RT$

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T dp = \frac{R}{p} dT - \frac{RT}{p^2} dp \quad (\text{A})$$

persamaan garis A-B adalah

$$\frac{T - T_1}{p - p_1} = \frac{T_2 - T_1}{p_2 - p_1}$$

atau

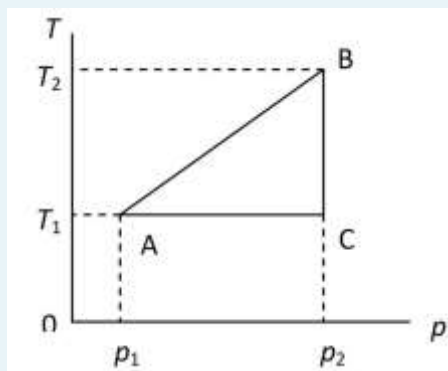
$$T = \frac{T_2 - T_1}{p_2 - p_1} (p - p_1) + T_1 \quad (\text{B})$$

sehingga

$$dT = \frac{T_2 - T_1}{p_2 - p_1} dp \quad (\text{C})$$

Persamaan A dapat diubah menjadi

$$dv = \frac{R}{p_2} (p dT - T dp) \quad (\text{D})$$



Gambar 4.7.





Jika Persamaan (B) dan (C) dimasukkan ke dalam Persamaan (D) diperoleh

$$\begin{aligned} dv &= \frac{R}{p^2} \left[ p \frac{T_2 - T_1}{p_2 - p_1} - \frac{T_2 - T_1}{p_2 - p_1} (p - p_1) + T_1 \right] dp \\ &= \frac{R}{p^2} \left[ \frac{pT_2 - pT_1 - pT_2 + pT_1 + p_1T_2 - p_1T_1 - p_2T_1 + p_1T_1}{p_2 - p_1} \right] dp \\ &= \frac{R}{p^2} \left[ \frac{p_1T_2 - p_2T_1}{p_2 - p_1} \right] dp \\ dv &= R \frac{p_2T_1 - p_1T_2}{p_2 - p_1} d\left(\frac{1}{p}\right) \end{aligned} \quad (E)$$

bila Persamaan (E) diintegrasikan dari keadaan 1 ke keadaan 2, diperoleh

$$v_2 - v_1 = \Delta v = R \frac{p_2T_1 - p_1T_2}{p_2 - p_1} \left[ \frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_1} \right]$$

ini dapat disederhanakan menjadi

$$\Delta v = v_2 - v_1 = \frac{R(p_1T_2 - p_2T_1)}{p_1p_2} \quad (F)$$

Inilah perubahan nilai  $v$  jika proses langsung melalui garis lurus dari A ke B. Sekarang berapakah nilai perubahan  $v$  jika proses melalui garis A-C (proses isothermal) dan melalui garis C-B (proses isobarik). Dari persamaan

$$dv = \frac{R}{p} dT - \frac{RT}{p^2} dp$$

diperoleh

$$dv = 0 - \frac{RT_1}{p^2} dp + \frac{R}{p_2} dT - 0$$

jika persamaan yang terakhir ini diintegrasikan dari keadaan 1 ke keadaan 2 diperoleh

$$\Delta v = v_2 - v_1 = -RT_1 \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p^2} + \frac{R}{p_2} \int_{T_1}^{T_2} dT$$

ini akan menghasilkan

$$\Delta v = v_2 - v_1 = \frac{R(p_1T_2 - p_2T_1)}{p_1p_2} \quad (G)$$

Nyatalah bahwa persamaan F dan G sama. Jadi integral  $dv$  tidak tergantung pada jalan yang dilalui, melainkan hanya pada keadaan awal dan akhir saja. Dengan perkataan lain,  $v$  adalah fungsi keadaan dan diferensialnya adalah diferensial eksak.

Periksa  
Kembali



## D. Soal Latihan



Latihan

1

Buktikanlah bahwa koefisien muai kubik suatu zat padat isotrop sama dengan 3 kali koefisien muai linearnya.

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Buktikanlah bahwa koefisien muai volume dapat dinyatakan sebagai

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

dan ketermampatan isothermal dapat dinyatakan sebagai

$$\mathcal{K} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T$$

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Persamaan suatu gas secara pendekatan dinyatakan sebagai

$$p(v - b) = RT$$

Buktikan bahwa

$$\beta = \frac{v-b}{vT} \quad \text{dan} \quad \mathcal{K} = \frac{(v-b)^2}{RTv}$$

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Buktikanlah bahwa:  $\left(\frac{\partial \beta}{\partial \rho}\right)_T = -\left(\frac{\partial \mathcal{K}}{\partial T}\right)_p$

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Suatu zat mempunyai nilai  $\mathcal{K} = \frac{a}{v}$  dan  $\beta = \frac{2bT}{v}$  dengan  $a$  dan  $b$  tetapan.

(a) Buktikan bahwa persamaan keadaannya

$$v - bT^2 + ap = C$$

(b) Jika pada tekanan  $p_o$  dan suhu  $T_o$ , volume jenisnya  $v_o$ , tentukanlah  $C$ .

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Jika seutas kawat yang panjangnya  $L$ , kemuaian linier ( $\alpha$ ) dan modulus Young isotermik ( $Y$ ) mengalami perubahan sangat kecil dari keadaan setimbang awal keadaan setimbang akhir akibat gaya ( $F$ ), buktikanlah bahwa perubahan gaya tegangannya sama dengan :

$$dF = -\alpha AY d\theta + \frac{AY}{L} dL$$

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali





Seutas kawat logam dengan luas penampang  $0,0085 \text{ cm}^2$ , gaya tegang  $20 \text{ N}$  dan temperatur  $20^\circ\text{C}$ , terentang antara dua dukungan tegar berjarak  $1,2 \text{ m}$ . Jika temperaturnya dikurangi sehingga menjadi  $8^\circ\text{C}$ ,  $\alpha = 1,5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $Y = 2,0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ . Berapakah tegangan akhirnya?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali

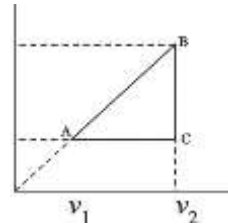
## E. Tugas



Tugas

1

Suatu gas sempurna menjalani proses dari A ke B melalui dua jalan, yaitu (a) dari A langsung ke B dan (b) dari A ke C kemudian ke B seperti pada gambar di samping. Buktikanlah bahwa perubahan suhu pada kedua proses itu sama.



### Penyelesaian

*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Hitunglah usaha yang dilakukan pada dua proses, yakni seperti pada gambar untuk soal no 1.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

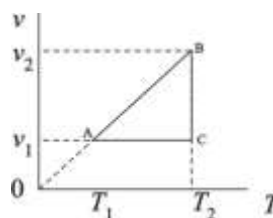
Jadi



Periksa  
Kembali



Suatu gas sempurna menjalani proses dari A ke B melalui dua jalan, yaitu (a) dari A langsung ke B dan (b) dari A ke C kemudian dari C ke B seperti pada gambar. Buktikanlah bahwa perubahan tekanan pada kedua proses itu sama.



### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Hitunglah usaha yang dilakukan pada dua proses, yakni seperti pada gambar di soal no 3.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

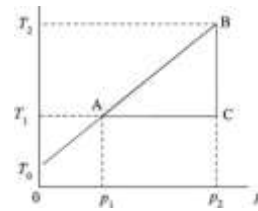
Jadi



Periksa  
Kembali



Hitunglah usaha yang dilakukan pada kedua proses, yaknidari A ke B melalui (a) dari A langsung ke B dan (b) dari A ke C kemudian dari C ke B seperti pada gambar berikut.



### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali

Hukum pertama termodinamika adalah pernyataan kekekalan energi. Hukum ini memiliki cakupan yang lebih luas jika dibandingkan dengan hukum kekekalan energi mekanik. Banyak hasil eksperimen yang menunjukkan hubungan usaha yang dilakukan pada atau dari sistem, panas yang ditambahkan atau dikurangkan dari sistem, dan energi internal sistem adalah kekal dan ini merupakan hukum pertama termodinamika. Hukum pertama termodinamika dipandang berlaku kepada tiap-tiap proses di alam yang berlangsung di antara keadaan sistem, lingkungan, maupun semesta.

### A. Usaha Termodinamik

Pada mekanika dikenal bahwa besar usaha oleh suatu gaya pada suatu benda, sama dengan hasil kali komponen gaya pada arah jalan dengan panjang jalan tersebut. Karena pada umumnya baik besaran maupun arah garis usaha gaya itu berubah-ubah, maka diambil jalan atau lintasan yang tak terhingga kecil  $ds$ , sehingga sepanjang  $ds$  gaya dapat dianggap tetap. Jadi

$$\delta W = F \cos \theta ds \quad (5.1)$$

$F \cos \theta$  adalah komponen gaya  $F$  pada arah jalan  $ds$  dan  $\theta$  sudut antara  $F$  dan  $ds$ . Jika benda bergerak melalui jalan yang terhingga, misalnya dari  $s_1$  ke  $s_2$  maka besar usaha oleh  $F$  adalah

$$W = \int \delta W = \int_{s_1}^{s_2} F \cos \theta ds \quad (5.2)$$

dalam mekanika juga dikenal, bahwa besar usaha oleh suatu gaya pada suatu benda sama dengan perubahan energi kinetiknya.

$$\delta W = dE_k \quad (5.3)$$

Jika benda bergerak dari tempat 1 ke tempat 2, maka besar usaha

$$W = \int_{E_{k1}}^{E_{k2}} dE_k \quad (5.4)$$

atau

$$W = E_{k2} - E_{k1} \quad (5.5)$$

Jika gaya yang bekerja pada benda itu konservatif, besar usahanya

$$W = -(E_{p2} - E_{p1}) \quad (5.6)$$

$E_p$  = energi potensial benda

Persamaan (5.5) berlaku untuk sembarang gaya, sedangkan Persamaan (5.6) hanya berlaku untuk gaya konservatif saja. Jadi untuk gaya konservatif

$$E_{k2} - E_{k1} = -(E_{p2} - E_{p1})$$

atau

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2} \quad (5.7)$$

Jumlah energi kinetik dengan energi potensial suatu benda disebut energi mekanik total  $E$ . Jadi

$$E = E_k + E_p \quad (5.8)$$

Jika pada benda itu kecuali gaya konservatif bekerja pula gaya yang nonkonservatif, maka usaha oleh gaya yang nonkonservatif ini sama dengan perubahan energi mekanis totalnya, yaitu

$$W_{nk} = E_2 - E_1 = (E_{k2} + E_{p2}) - (E_{k1} + E_{p1}) \quad (5.9)$$

Dari uraian di atas, tampaklah bahwa antara usaha dan energi terdapat hubungan yang amat erat. Satuannya pun sama yaitu joule dalam sistem SI. Usaha adalah bentuk peralihan (*transitional form*) dari energi, sedangkan energi kinetik ataupun energi potensial adalah bentuk energi tersimpan (*stored energy*).

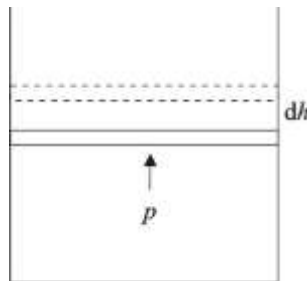
*Dalam termodinamika pengertian usaha menyatakan pertukaran energi antara sistem dengan lingkungan.* Usaha dapat dilakukan oleh sistem dapat pula dilakukan terhadap sistem. Contoh jenis pertama, misalnya gas dalam silinder mobil yang mendorong piston; sedang contoh jenis kedua misalnya udara di dalam pompa yang didorong untuk masuk ke dalam ban mobil. Usaha juga dapat terjadi jika sel elektrolit diberi muatan listrik atau dilucuti muatan listriknya, demikian pula dapat terjadi pada batang paramagnetik ketika dimagnetisasi atau didemagnetisasi.



## B. Usaha pada Perubahan Volume

Pada Gambar 5.1 terlukis suatu sistem yang terdiri atas sejumlah gas di dalam sebuah bejana yang dilengkapi dengan piston. Misalkan tekanan gas  $p$ , yang mungkin sekali berubah selama terjadinya proses. Jika luas penampang piston  $A$ , maka besar gaya pada piston adalah  $F=pA$ . Jika piston bergeser ke atas sejauh  $dh$ , maka besar usaha oleh gaya itu adalah  $\delta W$ . Tetapi  $A dh$  sendiri adalah perubahan volume  $dV$  dan  $\theta$ , yaitu sudut antara  $F$  dengan  $dh$  sama dengan nol jadi

$$\delta W = p dV \quad (5.10)$$



**Gambar 5.1.** Gas dalam suatu sistem melakukan usaha

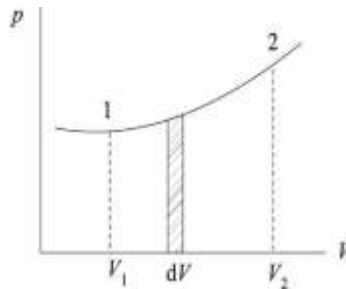
Jika proses itu berlangsung dari keadaan 1 ke keadaan 2 atau dari volume  $V_1$  ke volume  $V_2$  maka besar usaha yang dilakukan oleh sistem adalah

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (5.11)$$

Umumnya dalam proses itu  $p$  tidak tetap, sehingga tak boleh dikeluarkan dari tanda integral. Di sini perlu diadakan perjanjian mengenai tanda untuk usaha  $W$ . Jika usaha itu dilakukan oleh sistem,  $W$  akan diberi tanda positif ( $W = +$ ) dan sebaliknya jika usaha dilakukan terhadap sistem, maka  $W$  diberi tanda negatif ( $W = -$ ). Tentang perjanjian yang menyangkut tanda ini beberapa penulis mengadakan perjanjian yang berlawanan dengan perjanjian di sini. Karena itu persamaan seperti pada rumus (5.11), diberi tanda minus di bagian depan ruas kanan. Jika rumus-rumus di atas ruas kiri dan kanan dibagi dengan jumlah massa atau jumlah mol dalam sistem, maka rumus-rumus tersebut berubah menjadi hubungan nilai jenisnya dan sesuai dengan perjanjian dalam Bab I haruslah ditulis dengan huruf kecil. Jadi

$$\delta w = p dv \quad (5.12)$$

Hubungan antara tekanan dan volume sistem dalam suatu proses reversible, dapat dinyatakan dengan sebuah grafik pada diagram  $p$ - $V$  seperti pada Gambar 5.2. Pada perubahan volume sebesar  $dV$ , maka besar usaha oleh sistem adalah  $\delta W$  dan secara matematis dinyatakan oleh luas bagian yang bergaris. Jika volume berubah dari  $V_1$  ke  $V_2$ , maka usaha seluruhnya diperoleh dengan pengintegralan, seperti rumus (5.11).

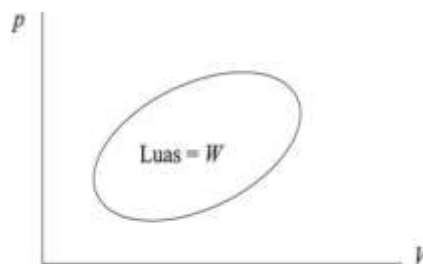


**Gambar 5.2.** Luas bagian yang bergaris menyatakan besar usaha untuk perubahan volume  $dV$

Secara matematis usaha ini dinyatakan oleh luas bangun yang dibatasi oleh grafik dan dua garis vertikal  $V_1$  dan  $V_2$ , serta sumbu  $V$ . Usaha ini adalah positif jika volume bertambah besar, dan negatif jika volume bertambah kecil. Yang pertama usaha dilakukan oleh sistem dan yang kedua usaha dilakukan terhadap sistem. Jika proses berputar kembali ke keadaan awal, maka proses disebut siklik dan dinyatakan sebagai

$$W = \oint p \, dV \quad (5.13)$$

Karena  $W$  bukan fungsi keadaan atau  $\delta W$  bukan diferensial eksak, maka umumnya rumus (5.13) tidak sama dengan nol.



**Gambar 5.3.** Proses siklik,  $W \neq 0$

Pada proses isometrik (isokhorik)  $V = C$  sehingga  $dV = 0$ . Ini berarti bahwa  $W$  seperti pada Rumus (5.11) sama dengan nol. Dengan perkataan lain tak ada usaha yang dilakukan oleh ataupun terhadap sistem. Pada proses isobarik, tekanan  $p = C$  sehingga dapat dikeluarkan dari tanda integral. Rumus (5.11) menjadi

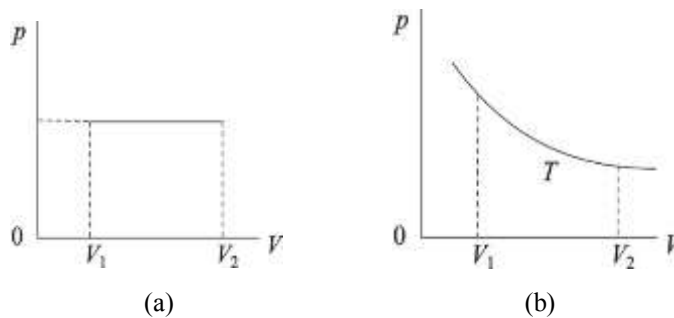
$$W = p \int_{V_1}^{V_2} dV = p (V_2 - V_1) \quad (5.14)$$

Grafiknya terlihat pada Gambar (5.4a). Pada proses isothermal suhu  $T$  tetap tidak berubah. Jadi untuk gas sempurna, usaha itu besarnya

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} dV = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (5.15)$$

Grafiknya ditunjukkan pada gambar (5.4.b)

Persamaan (5.15) dapat pula ditulis dalam bentuk lain, sebab untuk proses isothermal,  $p_1 V_1 = p_2 V_2 = C$ , atau



**Gambar 5.4.** Usaha oleh gas sempurna pada (a) proses isobarik, (b) proses isothermal

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2} \quad (5.16)$$

Jika Persamaan (5.16) ini dimasukkan ke dalam Persamaan (5.15) diperoleh

$$W = nRT \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (5.17)$$

### C. Bentuk Lain Usaha

Seperti telah disebutkan di atas bahwa ada bermacam-macam usaha dalam termodinamika, seperti usaha listrik, usaha magnetik, dan lain-lain. Pada sistem  $p$ - $V$ - $T$ , usaha itu bila dinyatakan dalam bentuk diferensial  $\delta W$  telah pula dijelaskan bahwa tekanan  $p$  adalah variabel intensif, yaitu variabel yang nilainya tak tergantung pada

massa sistem, sedangkan  $V$  adalah variabel ekstensif, nilainya tergantung pada massa sistem. Jika secara umum variabel intensif diberi lambang  $Y$ , dan variabel ekstensif diberi lambang  $X$ , maka secara umum usaha oleh sistem dapat dirumuskan sebagai

$$\delta W = Y dX \quad (5.18)$$

Ditinjau suatu sistem berupa sebatang kawat, panjang  $L$ , seperti terlukis pada Gambar 2.5. Jelaslah di sini bahwa  $L$  adalah variabel ekstensif, sebab nilainya tergantung pada massa sistem. Bila ujung kiri kawat dibuat tetap dan ujung kanan ditarik dengan gaya luar  $\mathcal{F}$  maka kawat akan bertambah panjang dengan  $dL$ . Di sini  $\mathcal{F}$  adalah variabel intensif, sebab nilainya tidak dipengaruhi oleh massa sistem. Dalam proses ini jelaslah bahwa usaha dilakukan terhadap sistem, sehingga nilainya harus negatif.



**Gambar 5.5.** Usaha pada kawat oleh gaya luar  $\mathcal{F}$

Apabila dirumuskan

$$\delta W = -\mathcal{F} dL \quad (5.19)$$

atau

$$W = -\int \mathcal{F} dL \quad (5.20)$$

Tanda minus diperlukan karena hasil kali  $\mathcal{F}$  dengan  $dL$  (positif dengan positif) adalah positif. Apabila arah  $\mathcal{F}$  dibalik, maka  $\mathcal{F}$  maupun  $dL$  menjadi negatif, sehingga hasil kalinya juga positif. Padahal nilainya negatif, sebab usaha itu dilakukan terhadap sistem. Karena itu diperlukan tanda minus. Untuk menentukan berapa nilai  $W$  seperti pada Persamaan (5.20), beberapa besaran perlu ditampilkan, yaitu tegangan (*stress*),  $\sigma$ , regangan (*strain*),  $\varepsilon$  dan modulus elastisitas,  $E$ , yang definisinya adalah sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{\mathcal{F}}{A} \quad (a)$$

dengan  $A$  = luasampang lintang kawat.

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L} \quad (b)$$

menurut Hooke

$$\sigma = E\varepsilon \quad (c)$$

Bila ketiga persamaan ini dimasukkan ke dalam Persamaan (5.20) akan diperoleh

$$W = -VE \int_0^\epsilon \epsilon \, d\epsilon = -\frac{VE}{2} \epsilon^2 \quad (5.21)$$

$V = AL$  = volume kawat

untuk sistem yang hanya melibatkan usaha elektrik saja

$$W = -\int_1^2 \gamma dZ \quad (5.22)$$

Dengan  $\gamma$  = tegangan gerak elektrik (*elektromotif force*) dan  $Z$  = muatan listrik. Untuk sistem yang hanya melibatkan usaha magnetik saja

$$W = -\mu_0 \int_1^2 \kappa dM \quad (5.23)$$

dengan  $\kappa$  = intensitas magnetik dan  $M$  = momen magnetik.

Untuk sistem yang melibatkan tegangan permukaan pada suatu selaput atau lapisan, besar usaha itu adalah

$$W = -\int_1^2 \rho dA \quad (5.24)$$

dengan  $\rho$  = tegangan permukaan dan  $A$  = luas permukaan.

Untuk suatu sistem yang berbentuk lempeng elektrik, maka besar usahanya adalah

$$W = -\int_1^2 E dP \quad (5.25)$$

$P$  adalah momen dipol lempeng, yang sama dengan hasil kali polarisasinya (momen dipol per satuan volume) dengan volumenya  $V$ , sedangkan  $E$  adalah intensitas elektrik. Satuan polarisasi adalah  $\text{Cm}^{-2}$  sehingga satuan momen dipol menjadi  $\text{Cm}$ . Satuan  $E$  adalah  $\text{V m}^{-1} = \text{N C}^{-1}$ .

#### D. Usaha Konfigurasi dan Disipatif

Beberapa contoh di atas memberisimpulan bahwa usaha dalam proses reversibel dapat dinyatakan sebagai hasil kali variabel intensif ( $p, \kappa, \gamma, \rho$ ) dengan variabel ekstensif ( $V, M, Z, A$ ). Bila secara umum variabel intensif dinyatakan dengan lambang  $Y$  dan variabel ekstensif dengan  $X$ , maka

$$\delta W = Y_1 dX_1 + Y_2 dX_2 + \dots = \sum Y dX \quad (5.26)$$

Perlu diperhatikan bahwa tiap suku harus dikenai tanda positif atau negatif sesuai dengan jenis sistemnya, seperti  $\rho dV$ ,  $-\kappa dM$  dan sebagainya. Variabel ekstensif  $X$  dikatakan menentukan konfigurasi sistem dan usaha  $\Sigma Y dX$  disebut usaha konfigurasi. Dapat terjadi bahwa konfigurasi sistem dapat berubah tanpa menimbulkan usaha, misalnya pada ekspansi bebas (*free expansion*) untuk sistem  $p$ - $V$ - $T$ .

Ditinjau suatu sistem yang terdiri atas fluida dengan pengaduknya. Jika fluida itu diaduk, maka momen gaya luar selalu searah dengan pergeseran sudut batang pengaduk dan usaha oleh momen gaya luar selalu negatif sebab usaha itu selalu dilakukan terhadap sistem. Secara umum usaha semacam itu disebut usaha disipatif. Contoh lain usaha disipatif ialah usaha untuk mempertahankan arus listrik  $I$  pada hambatan  $R$ . Usaha listrik sebesar  $\int I^2 R dt$  harus dilakukan pada hambatan itu, kemanapun arah arus tersebut. Berbeda dengan usaha konfigurasi, usaha disipatif dalam suatu proses tak dapat dinyatakan sebagai perubahan sifat sistem yang dikenai usaha. Akan terlihat ada hubungan yang erat antara usaha disipatif dengan aliran kalor.

Usaha disipatif yang berlangsung dalam proses apapun adalah ireversibel. Pada umumnya, baik usaha konfigurasi maupun usaha disipatif dapat terjadi dalam satu proses yang sama. Usaha total dalam proses itu didefinisikan sebagai jumlah aljabar dari usaha konfigurasi dengan usaha disipatif. Jika proses itu reversibel, maka usaha disipatif sama dengan nol. Dengan perkataan lain, usaha itu hanya terdiri atas usaha konfigurasi saja. Jadi syarat agar suatu proses adalah reversibel ialah: (a) proses harus kuasistatik dan (b) usaha disipatif harus sama dengan nol.

## E. Energi Dalam dan Energi Total

Energi dalam  $U$  suatu sistem ialah besar energi yang dimiliki oleh sistem itu dalam keadaan seimbang. Jadi energi dalam adalah variabel atau besaran keadaan. Tiap keadaan seimbang mempunyai nilai  $U$  yang tertentu. Dengan demikian  $dU$  adalah diferensial eksak, dan dalam suatu proses perubahan  $U$  hanya ditentukan oleh keadaan awal dan akhir saja, dan tidak ditentukan oleh jalan yang dilalui. Energi dalam sistem, misalnya sistem  $p$ - $V$ - $T$ , adalah jumlah energi kinetik dan energi potensial molekul–molekulnya. Energi kinetik disebabkan karena molekul–molekul gas selalu bergerak atau mungkin juga karena molekul–molekulnya bergetar. Energi potensial disebabkan

karena molekul–molekul gas tarik–menarik. Gas sempurna didefinisikan sebagai gas yang molekul–molekulnya tidak tarik–menarik, sehingga tidak mempunyai energi potensial antar molekul walaupun masih mempunyai energi potensial elastik. Karena itu energi dalam gas sempurna hanya terdiri atas tenaga kinetik molekul–molekul dan energi potensial elastik saja. Karena bersangkutan dengan gerakan, maka kiranya dapat dipahami bahwa energi kinetik molekul–molekul gas merupakan fungsi suhu. Semakin tinggi suhu gas, semakin tinggi pula energi kinetiknya. Satuan energi dalam pada sistem SI adalah Joule (J).

Apabila sistem secara keseluruhan dalam keadaan diam terhadap lingkungan, maka hanya energi dalamlah yang dimiliki oleh sistem tersebut. Namun apabila kedudukan sistem itu secara keseluruhan berubah terhadap lingkungan atau sistem itu secara keseluruhan bergerak relatif terhadap lingkungan, artinya terhadap kerangka acuan atau koordinat yang dipilih pada lingkungan, maka di samping energi dalam masih terdapat pula energi kinetik,  $E_k$ , dan energi potensial,  $E_p$  yang sifatnya bukan dalam (internal). Kedua jenis energi ini bersifat relatif terhadap lingkungan. Hal ini disebabkan karena gerakan ataupun kedudukan suatu benda (sistem) selalu bersifat relatif. Suatu benda dikatakan bergerak bagi pengamat yang diam dapat pula dikatakan sebagai diam bagi pengamat yang bergerak kearah sama dengan kelajuan yang sama.

Apabila massa total sistem  $m$  dan bergerak dengan kelajuan  $c$  terhadap lingkungan, maka energi kinetiknya

$$E_k = \frac{1}{2} mc^2 \quad (5.27)$$

dan apabila sistem itu terletak pada ketinggian  $z$  dari lingkungan yang diacu, maka energi potensialnya

$$E_p = mgz \quad (5.28)$$

Bila suatu sistem menjalani suatu proses, maka perubahan energinya

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p \quad (5.29)$$

atau

$$\Delta E = (U_2 - U_1) + (E_{k2} - E_{k1}) + (E_{p2} - E_{p1}) \quad (5.30)$$

atau

$$\Delta E = (U_2 + E_{k2} + E_{p2}) - (U_1 + E_{k1} + E_{p1}) \quad (5.31)$$

dalam keadaan khusus kemungkinan kedudukan sistem tidak berubah relatif terhadap kerangka koordinat yang dipilih pada lingkungan, sehingga  $E_k$  maupun  $E_p$  tidak mengalami perubahan atau  $\Delta E_k$  dan  $\Delta E_p$  keduanya sama dengan nol. Dengan demikian maka

$$\Delta E = \Delta U = U_2 - U_1 \quad (5.32)$$

## F. Aliran Kalor

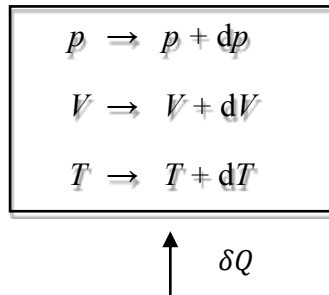
Andaikan suatu sistem yang mula-mula dalam keadaan seimbang kemudian dipanasi, artinya sejumlah energi kalor  $Q$  dimasukkan ke dalam sistem tersebut. Tentu saja sistem itu akan mengalami perubahan. Sebagai contoh, ambillah sistem  $p$ - $V$ - $T$  pada gas. Karena adanya kalor yang masuk ini, maka umumnya tekanan, volume dan suhunya akan berubah. Dengan demikian maka pada umumnya, energi totalnya juga berubah dan mungkin pula bahwa sistem itu melakukan usaha. Perubahan keadaan atau proses itu juga akan terjadi jika sejumlah kalor dikeluarkan dari sistem, namun perubahan itu sifatnya berlawanan dengan apa yang dikemukakan di atas. Berbeda dengan  $E$ , maka  $Q$  bukan merupakan besaran atau variabel keadaan. Pada suatu keadaan seimbang tak dapat ditanyakan berapa besar energi kalor dalam suatu sistem. Pengertian ini hanya timbul bila terjadi suatu proses, atau perubahan dari satu keadaan seimbang ke keadaan seimbang yang lain. Besar  $Q$  tergantung pada proses atau jalan yang dilalui. Dengan perkataan lain  $\delta Q$  bukanlah diferensial eksak, seperti halnya  $\delta W$ . Perhatikanlah bahwa  $\int_1^2 \delta Q = Q$ , bukan  $Q_2 - Q_1$  dan  $\oint \delta Q$  tidak sama dengan nol. Sama halnya  $\delta W$  atau  $W$ , maka  $\delta Q$  ataupun  $Q$  adalah energi peralihan (*transitional energy*), bukan energi tersimpan (*stored energy*). Energi peralihan dapat bergerak dan dapat menembus dinding batas sistem.

## G. Hukum Pertama Termodinamika

Termodinamika adalah salah satu cabang fisika, sehingga tidaklah mengherankan apabila di dalam termodinamika pun dikenal adanya hukum kekekalan. Telah diketahui bahwa kalor adalah suatu bentuk energi, demikian pula usaha adalah suatu bentuk energi. Gambar di bawah ini melukiskan suatu sistem  $p$ - $V$ - $T$  yang mula-mula dalam keadaan seimbang dengan tekanan  $p$ , volume  $V$  dan suhu  $T$ . Kemudian



sejumlah kalor  $\delta Q$  masuk ke dalam sistem, sehingga terjadilah suatu proses. Tekanan  $p$  berubah menjadi  $p + dp$ , volume  $V$  menjadi  $V + dV$  dan suhu  $T$  menjadi  $T + dT$ . Karena suhunya berubah, maka energi dalamnya juga berubah; namakan perubahan itu  $dU$ . Akan tetapi karena  $U$  berubah maka energi total pun  $E$  juga berubah yang boleh dinamakan  $dE$ . Selanjutnya karena volume berubah maka sistem melakukan usaha; namakan usaha ini  $\delta W$ . Sesuai dengan hukum kekekalan,



**Gambar 5.6.** Aliran kalor yang masuk ke dalam sistem menimbulkan perubahan energi dan menimbulkan usaha

maka besar kalor yang masuk ke dalam sistem haruslah sama dengan perubahan yang ditimbulkannya. Karena itu

$$\delta Q = dE + \delta W \quad (5.33)$$

Disebut Hukum Pertama Termodinamika bentuk umum.

Jika kalor yang masuk terhingga (finite), dinamakan  $Q$ , maka persamaan di atas menjadi

$$Q = \int_1^2 \delta Q = \int_{E_1}^{E_2} dE + \int_1^2 \delta W$$

atau

$$Q = (E_2 - E_1) + W \quad (5.34)$$

Persamaan (5.33) dan (5.34) disebut hukum pertama termodinamika bentuk umum.

Pada keadaan khusus mungkin kedudukan keseluruhan sistem relatif terhadap kerangka acuan pada lingkungan tidak berubah selama proses, sehingga  $E_k$  dan  $E_p$  tidak mengalami perubahan. Oleh karena itu maka  $dE = dU$  dan  $E_2 - E_1 = U_2 - U_1$ . Kedua persamaan di atas menjadi

$$\delta Q = dU + \delta W \quad (5.35)$$

$$Q = (U_2 - U_1) + W \quad (5.36)$$

Bentuk kedua persamaan terakhir ini disebut hukum pertama termodinamika bentuk khusus. Bila dicermati maka sebenarnya hukum pertama termodinamika ini tidak lain adalah hubungan antara energi peralihan (*transitional energy*) dan energi tersimpan (*stored energy*).

Pada proses siklik (keadaan akhir identik dengan keadaan awal atau kembali ke keadaan awal), maka  $U_1 = U_2$  atau  $U_2 - U_1 = 0$ . Karena  $U$  fungsi keadaan. Dalam keadaan yang sama nilai  $U$  juga sama. Tetapi pada proses siklik mungkin juga ada kalor yang keluar dari sistem. Dengan demikian pada proses siklik kalor netto yang masuk ke dalam sistem seluruhnya digunakan untuk melakukan usaha.

## H. Kapasitas Kalor dan Kapasitas Kalor Jenis

Besaran kalor yang masuk atau keluar sistem dinyatakan dalam satuan kalori atau Btu (British thermal unit). *Satu kalori didefinisikan sebagai kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 gram air dengan 1 °C*. Sementara itu 1 Btu didefinisikan sebagai kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 lb air dengan 1 °F. Oleh karena 1 lb = 454 g dan 1 skala suhu F = 5/9 skala suhu C, maka dengan mudah dapat dicari hubungan antara Btu dan kalori. Hubungan itu adalah

$$1 \text{ Btu} = 252 \text{ kalori}$$

Kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 g air dengan 1 skala suhu C, misalnya dari 10 °C ke 11 °C ternyata berbeda dengan kenaikan suhu dari 60 °C ke 61 °C. Oleh karena itu biasanya diambil untuk selang suhu tertentu dan yang dipilih ialah antara 14,5 °C dan 15,5 °C. Kalor ini disebut kalori 15-derajat, yang untuk selanjutnya kalori saja.

Jika kenaikan suhu yang sama ditimbulkan oleh usaha disipatif ternyata dari hasil eksperimen yang terbaik, besar usaha disipatif ini adalah 4,1858 J dan ini disebut kesetaraan mekanis kalor (*mechanical equivalent of heat*). Jadi

$$1 \text{ kalori} = 4,1858 \text{ J}$$

Sementara itu Komisi Internasional telah sepakat untuk mendefinisikan satuan kalori Tabel Uap Internasional yang Baru (The New International Steam Table Calorie) dengan hubungan

$$1 \text{ kalor IT} = \frac{1}{860} \text{ watt jam} = \frac{3600}{860} \text{ joule}$$

Angka 860 dipilih agar supaya 1 kalor IT sangat mendekati nilai eksperimen untuk 1 kalori.

*Kapasitas kalor suatu zat ialah banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu zat itu dengan 1 K.* Jika suatu zat itu naik dengan  $dT$  dan kapasitas kalor zat itu  $C$ , maka kalor yang diperlukan adalah

$$\delta Q = C dT$$

Jadi kapasitas kalor zat itu dapat dirumuskan sebagai

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad (5.37)$$

Pada umumnya kapasitas kalor  $C$  berubah dengan suhu  $T$ , jadi  $C$  adalah fungsi dari  $T$ . Artinya pada kenaikan suhu dari 273 K menjadi 274 K diperlukan kalor yang berbeda dengan kenaikan dari 300 K ke 301 K. Kapasitas rata-rata dapat dirumuskan sebagai

$$\bar{C} = \frac{Q}{\Delta T} \quad (5.38)$$

Perbedaan kedua rumus di atas adalah bahwa pada perumusan pertama dihindaki selang suhu yang tak terhingga kecil, misalnya untuk kenaikan suhu dari  $T$  menjadi  $T + dT$ . Demikian pula kalor yang diperlukan  $\delta Q$  juga tak terhingga kecil. Pada perumusan yang kedua  $\Delta T$  adalah perubahan suhu yang terhingga, bukan tak terhingga kecil, bahkan boleh besar. Nilai  $Q$  tentu saja juga boleh besar.

Dari definisi di atas jelaslah bahwa satuan kapasitas dalam sistem SI adalah  $\text{JK}^{-1}$ . Jika kapasitas kalor dibagi dengan massa zat  $m$ , hasilnya disebut kapasitas kalor jenis,  $c$ . Jadi

$$c = \frac{C}{m} = \frac{\delta Q}{m dT} = \frac{\delta q}{dT} \quad (5.39)$$

Satuan kapasitas kalor jenis ialah  $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Jika kapasitas kalor  $C$  dibagi dengan jumlah mol  $n$  dalam sistem, hasilnya disebut kapasitas kalor jenis molar, yang juga diberi lambang  $c$ . Jadi

$$c = \frac{C}{n} = \frac{\delta Q}{n dT} = \frac{\delta q}{dT} \quad (5.40)$$

Satuan kapasitas kalor jenis molar ialah  $\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Kalor yang masuk atau keluar dari sistem

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} C \, dT = m \int_{T_1}^{T_2} c \, dT \quad (5.41)$$

atau

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} C \, dT = n \int_{T_1}^{T_2} c \, dT \quad (5.42)$$

Umumnya baik  $C$  maupun  $c$  tidak konstan, melainkan merupakan fungsi suhu, sehingga tak boleh dikeluarkan dari tanda integral. Jadi  $C$  ataupun  $c$  hanya boleh dikeluarkan dari tanda integral bila dapat dianggap konstan.

Andaikan 1 kg atau 1 mol gas menyerap kalor sebanyak  $\delta q$  sehingga suhunya berubah dari  $T$  menjadi  $T+dT$ . Penyerapan kalor ini dapat melalui bermacam-macam proses misalnya proses tekanan tetap, volume tetap, atau melalui proses yang lain lagi. Banyaknya kalor yang diserap berbeda untuk proses yang berbeda. Oleh karena kapasitas kalor jenis  $c = \delta q/dT$ , maka dapatlah kiranya dipahami bahwa suatu zat mempunyai bermacam kapasitas kalor jenis. Kapasitas kalor jenis yang bersangkutan dengan proses isobarik disebut kapasitas kalor jenis pada tekanan tetap, dan diberi lambang  $c_p$ ; sementara itu kapasitas kalor jenis yang bersangkutan dalam proses isokhorik disebut kapasitas kalor jenis pada volume tetap, dan diberi lambang  $c_v$ . Kedua macam kapasitas kalor jenis inilah yang penting dan ternyata keduanya adalah fungsi suhu dan tekanan.

Suatu sistem yang mempunyai kapasitas kalor sangat besar demikian rupa sehingga walaupun sejumlah kalor yang mengalir masuk atau keluar sistem itu, tetapi suhunya dapat dianggap tidak berubah, disebut reservoir kalor. Oleh karena itu maka suatu proses reversibel yang dilaksanakan oleh suatu sistem yang berhubungan dengan reservoir adalah isothermal.

## 1. Kalor Transformasi dan Entalpi

Kalor transformasi atau kalor laten suatu zat  $l$ , ialah kalor yang diserap atau dilepaskan oleh 1 kg zat itu agar supaya terjadi perubahan fase. Kalor transformasi per mol disebut kalor transformasi molar. Satuan kalor transformasi dalam satuan SI ialah J/kg dan J/mol beturut-turut untuk kalor transformasi per kg dan kalor transformasi molar.

Perubahan fase sering kali diikuti dengan perubahan volume, sehingga disertai oleh usaha yang dilakukan oleh atau terhadap sistem. Hal ini dikecualikan pada volume kritis, karena volume jenis zat cair pada suhu ini sama dengan volume jenis uap. Jika perubahan fase ini terjadi pada suhu yang tetap maka tekanannya juga tetap, sehingga usaha oleh sistem per satuan massa atau per mol adalah

$$w = p(v_2 - v_1)$$

Karena tekanan tetap, maka  $p = p_1 = p_2$ , sehingga

$$w = p_2v_2 - p_1v_1$$

Sesuai dengan hukum pertama termodinamika, maka

$$u_2 - u_1 = l - (p_2v_2 - p_1v_1)$$

Persamaan ini dapat diubah menjadi

$$l = (u_2 + p_2v_2) - (u_1 + p_1v_1) \quad (5.43)$$

Suku-suku dalam kurung pada ruas kanan dinamakan entalpi dan diberi lambang  $h$ , jadi

$$h = u + pv \quad (5.44)$$

Persamaan (5.43) menjadi

$$l = h_2 - h_1 \quad (5.45)$$

karena  $p$ ,  $v$  dan  $u$  adalah variabel keadaan, maka  $h$  juga variabel keadaan dan diferensialnya adalah diferensial eksak. Selanjutnya akan digunakan lambang-lambang berikut.

$l_{pc}$  untuk perubahan fase padat – cair.

$l_{cu}$  untuk perubahan fase cair – uap.

$l_{pu}$  untuk perubahan fase padat – uap.

Ketiga proses di atas berturut-turut disebut pencairan, penguapan dan sublimasi. Untuk entalpi suatu zat pada bermacam fase digunakan lambang berikut.

$h_p$  untuk entalpi zat padat

$h_c$  untuk entalpi zat cair.

$h_u$  untuk entalpi uap.

Jadi dengan demikian maka

$$\begin{aligned}
 l_{pc} &= h_c - h_p \\
 l_{cu} &= h_u - h_c \\
 l_{pu} &= h_u - h_p
 \end{aligned}$$

ternyata bahwa kalor transformasi  $l_{cu}$  untuk air berubah dengan suhu, yaitu turun bila T naik dan menjadi nol pada suhu kritis, dan untuk air adalah 374°C.

Bila suatu zat sebagian dalam keadaan cair dan sebagian lagi dalam keadaan uap pada suhu jenuh, maka kualitas zat itu didefinisikan sebagai perbandingan massa uap dengan massa total dan di beri lambang  $x$ . Jadi

$$x = \frac{m_u}{m} = \frac{m_u}{m_c + m_u} \quad (5.46)$$

Misalnya massa uap 0,2 kg dan massa cairan 0,8 kg, maka kualitasnya  $x = 0,2$  atau 20%. Kualitas dapat dianggap sebagai besaran intensif, dan kualitas hanya mempunyai arti bila zat itu dalam keadaan jenuh, yaitu pada tekanan dan suhu jenuh.

Suatu zat yang berada hanya sebagai uap pada suhu jenuh disebut uap jenuh dan kualitasnya 100%. Apabila suhu uap itu lebih tinggi dari pada suhu jenuh, maka uap itu disebut superpanas. Tekanan dan suhu uap yang superpanas adalah dua sifat yang tergantung, sebab suhu boleh berubah sementara tekanan tetap tak berubah. Pada hakekatnya zat-zat yang disebut gas adalah uap yang superpanasnya tinggi. Bila  $V_c$  adalah volume cairan,  $V_u$  volume uap dan  $V$  volume total, maka

$$V = V_c + V_u \text{ atau } mv = m_c v_c + m_u v_u$$

$$v = \frac{m_c}{m} v_c + \frac{m_u}{m} v_u = \frac{m - m_u}{m} v_c + \frac{m_u}{m} v_u = (1 - x)v_c + xv_u$$

atau

$$v = v_c + x(v_u - v_c) = v_c + xv_{cu} \quad (5.47)$$

$$v_{cu} = v_u - v_c \quad (5.48)$$

untuk energi dalam,

$$U = U_c + U_u \text{ atau } mu = m_c u_c + m_u u_u$$

Bila ruas kiri dan kanan di bagi dengan  $m$ , maka seperti halnya untuk volume akan di peroleh

$$u = u_c + xu_{cu} \quad (5.49)$$

$$u_{cu} = u_u - u_c \quad (5.50)$$

Demikian pula untuk entalpi

$$h = h_c + xh_{cu} \quad (5.51)$$

$$h_{cu} = h_u - h_c \quad (5.52)$$

## J. Kalor Jenis Volume Tetap dan Kalor Jenis Tekanan Tetap

Pada subbab ini akan dibahas suatu zat dengan satu fase homogen dan dengan komposisi yang tetap. Fase ini boleh padat, cair ataupun gas, tetapi tak ada perubahan fase. Selanjutnya akan dicari hubungan antara kapasitas kalor jenis (sering disingkat kalor jenis) dengan variabel termodinamik yang lain. Bentuk khusus hukum pertama termodinamika itu sebenarnya juga menyatakan perpindahan kalor. Sementara itu akan diandaikan bahwa zat itu termampatkan dan proses berlangsung secara kuasistatik. Karena itu

$$\delta Q = dU + \delta W = dU + p dV$$

Pada volume tetap, maka  $p dV = 0$ , sehingga kalor jenis

$$c_v = \frac{1}{m} \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_V = \frac{1}{m} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_V \quad (5.53)$$

Pada tekanan tetap,  $p_1 = p_2 = p$  dan  $W = p(V_2 - V_1)$

$$\text{Sehingga} \quad Q = (U_2 - U_1) + p(V_2 - V_1)$$

$$\text{atau} \quad Q = (U_2 + p_2 V_2) - (U_1 + p_1 V_1)$$

$$\text{atau} \quad Q = H_2 - H_1 \quad (5.54)$$

Dalam bentuk diferensial menjadi

$$\delta Q = dH \quad (5.55)$$

Kalor jenis menjadi

$$c_p = \frac{1}{m} \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_p = \frac{1}{m} \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (5.56)$$

Pada umumnya baik  $c_v$  maupun  $c_p$  merupakan fungsi suhu. Untuk perubahan suhu yang tidak terlalu besar dapat di ambil nilai rata-ratanya. Jadi

$$c_v \cong \left( \frac{\Delta u}{\Delta T} \right)_v \quad \text{dan} \quad c_p \cong \left( \frac{\Delta h}{\Delta T} \right)_p \quad (5.57)$$

Sebagai contoh misalnya pada tekanan 0,5 MPa dan suhu 350°C,  $h = 3167,7$  kJ/kg dan pada tekanan 0,5 MPa tetapi suhu 400°C,  $h = 3271,9$  kJ/kg. Jadi  $\Delta h = 104,2$  kJ/kg dan  $\Delta T = 50$  K, sehingga

$$c_p = \frac{104,2}{50} \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1} = 2,084 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Untuk zat padat atau zat cair, volume jenisnya adalah sangat kecil sehingga untuk sembarang proses

$$dh = du + d(pv) \cong du \quad (5.58)$$

dan selanjutnya

$$dh \cong du \cong c \, dT \quad (5.59)$$

Dalam hal ini  $c$  adalah kalor jenis pada volume tetap ataupun pada tekanan tetap, karena keduanya hampir sama. Dalam banyak proses yang melibatkan zat padat ataupun zat cair, kita dapat menganggap bahwa kalor jenis adalah tetap, kecuali bila proses itu pada suhu rendah dan melalui jangkauan suhu yang lebar. Dalam hal ini Persamaan (5.59) dapat diintegrasikan menjadi

$$h_2 - h_1 \cong u_2 - u_1 \cong c(T_2 - T_1) \quad (5.60)$$

Bila dalam suatu proses lain  $c$  tak dapat dianggap, maka  $c$  sebagai fungsi  $T$ , harus diketahui agar Persamaan (5.59) dapat diintegrasikan.

## K. Energi Dalam, Entalpi dan Kalor Jenis Gas Sempurna

Gas sempurna pada hakikatnya tak terdapat di alam, tetapi didekati oleh gas nyata yang rapatnya cukup rendah, sehingga gaya antar molekul dan energi yang terkait, karena kecilnya dapat diabaikan. Persamaan keadaannya untuk satu mol

$$pv = RT$$

Dalam Bab VI akan diperlihatkan bahwa energi dalam gas sempurna hanyalah merupakan fungsi suhu saja. Jadi

$$U = f(T)$$



Ini berarti bahwa gas sempurna pada suhu tertentu mempunyai nilai  $U$  tertentu berapapun tekanannya. Dari hubungan  $c = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$ , maka untuk gas sempurna menjadi

$$c_v = \frac{du}{dT} \quad (5.61)$$

atau

$$du = c_v dT \quad \text{dan} \quad dU = mc_v dT$$

Dari definisi entalpi dan persamaan keadaannya, dapat diperoleh hubungan

$$h = u + pv = u + RT \quad (5.62)$$

Karena  $R$  tetapan dan  $u$  hanya fungsi suhu saja, maka entalpi  $h$  juga hanya merupakan fungsi suhu saja. Jadi

$$h = f(T)$$

Dari hubungan  $c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$ , maka untuk gas sempurna menjadi

$$c_p = \frac{dh}{dT} \quad (5.63)$$

atau

$$dh = c_p dT \quad \text{dan} \quad dh = mc_p dT$$

Karena energi dalam  $U$  dan entalpi  $H$  untuk gas sempurna hanya merupakan fungsi  $T$  saja, maka kalor jenis pada volume tetap ataupun tekanan tetap juga hanya merupakan fungsi  $T$  saja.

$$c_v = f(T) \qquad c_p = f(T)$$

Sifat semua gas mendekati sifat gas sempurna bila tekanannya mendekati nol. Karena itu kalor jenis gas sempurna untuk suatu zat nyata sering disebut sebagai kalor jenis tekanan nol, dan di beri lambang  $c_{po}$ . Kalor jenis volume tetap pada tekanan nol diberi lambang  $c_{vo}$ . Jadi

$$c_{vo} = f(T) \qquad c_{po} = f(T)$$

Dari hubungan

$$h = u + pv = u + RT$$

diperoleh

$$dh = du + R dT$$

$$c_{po}dT = c_{vo}dT + R dT$$

atau

$$c_{po} - c_{vo} = R \quad (5.64)$$

Dalam suatu proses, bila  $c_p$  tetap

$$h_2 - h_1 = c_{po}(T_2 - T_1)$$

Bila pada suhu acuan  $T_o$  entalpi  $h$  dianggap sama dengan nol, maka

$$h_T = \int_{T_o}^T c_{po} dT \quad (5.65)$$

Bila zat menjalani proses dari keadaan 1 ke keadaan 2, maka perubahan entalpi nya

$$h_2 - h_1 = \int_{T_o}^{T_2} c_{po} dT - \int_{T_o}^{T_1} c_{po} dT = h_{T_2} - h_{T_1} \quad (5.66)$$

## L. Kekekalan Massa

Jika meninjau segi massa, maka suatu sistem dapat pula didefinisikan sebagai sejumlah massa yang tetap. Pertanyaan yang sekarang timbul ialah apakah massa sistem itu berubah manakala sistem itu menjalani suatu proses? Bila benar, maka definisi kita tentang sistem sebagai sejumlah massa yang tetap tidak lagi berlaku bila energi sistem mengalami perubahan.

Dari teori relativistik kita mengetahui bahwa massa dan energi dihubungkan oleh persamaan yang terkenal, yaitu

$$E = mc^2 \quad (5.67)$$

dengan  $c$  = kelajuan cahaya dan  $E$  = energi. Dari persamaan ini memang dapat disimpulkan bahwa massa akan berubah manakala energinya berubah. Andaikan suatu sistem berupa sebuah bejana tegar berisi 1 kg bahan bakar bensin dan udara. Setelah terjadi pembakaran 2900 kJ bahan keluar dari sistem sehingga sistem kembali ke keadaan semula. Dari hukum pertama

$$Q = U_2 - U_1 + W$$

dalam hal ini  $W = 0$  karena bejananya tegar, jadi tidak mengalami perubahan volume. Sementara itu  $Q = -2900$  kJ, sehingga energi dalam sistem turun dengan jumlah tersebut. Jadi penurunan massa sistem

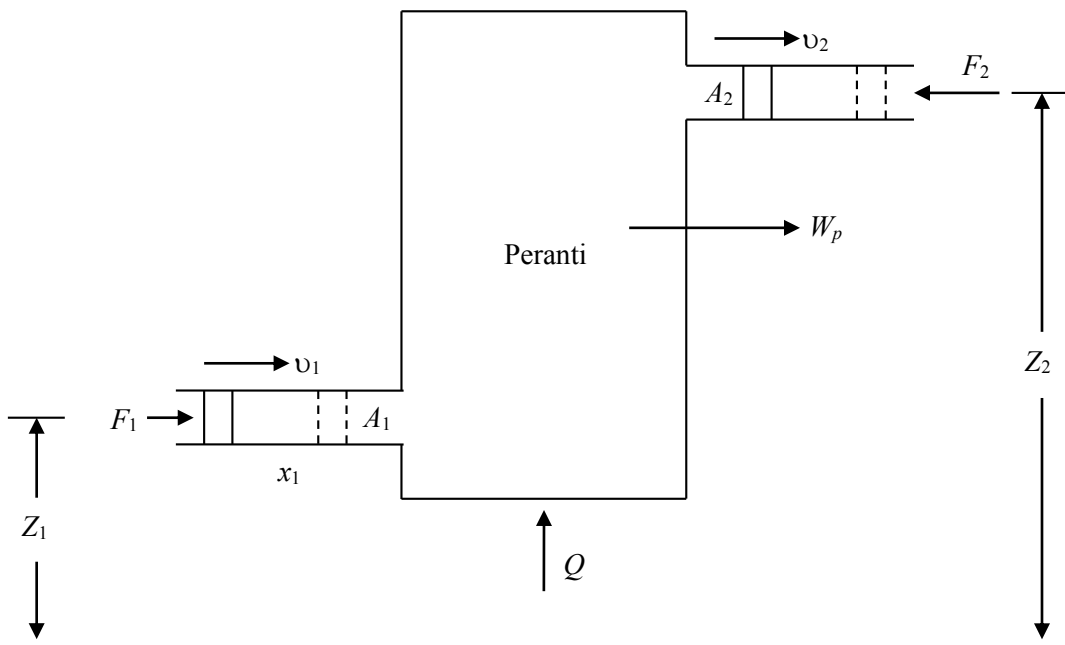
$$m = \frac{E}{c^2} = 2900000 \text{ J} / (2,9979 \times 10^8 \text{ m/s}^2) = 3,23 \times 10^{-11} \text{ kg}$$

Perubahan massa sebesar ini tentu tak dapat dideteksi.

### M. Persamaan Energi untuk Aliran Tunak

Bentuk umum hukum pertama, sesuai dengan namanya berlaku umum, sehingga untuk kasus-kasus yang bersifat lebih khusus dapat dijabarkan dari rumus yang bersifat umum itu. Di bawah ini diberikan beberapa contoh penerapan pada beberapa proses aliran tunak (*steady flow*).

Pada Gambar 5.7, terlukis suatu peranti yang menggambarkan proses aliran tunak. Fluida yang tak termampatkan (*incompressible*) dan tak kental (*nonviscous*), mengalir dari kiri dengan kelajuan  $v_1$  masuk ke dalam peranti dari sebelah kiri dan selanjutnya keluar dari sebelah kanan dengan kelajuan  $v_2$ .



Gambar 5.7. Proses aliran tunak

Gaya dorong pada piston kiri dan kanan masing-masing adalah

$$F_1 = p_1 A_1 \text{ dan } F_2 = p_2 A_2$$

Besar usaha

$$F_2 x_2 + F_1 x_1 = p_2 A_2 x_2 - p_1 A_1 x_1 = p_2 V_2 - p_1 V_1$$

Volume  $V_1$  dan  $V_2$  adalah volume massa  $m$  yang masuk dan keluar dari peranti. Gaya gravitasi pada massa  $m$  adalah  $mg$ , dan usaha oleh gaya konservatif ini

$$W_k = mg(Z_2 - Z_1)$$

Usaha total termasuk usaha yang dilakukan oleh peranti  $W_p$

$$W_t = W_p + (p_2 V_2 - p_1 V_1) + mg(Z_2 - Z_1)$$

Usaha oleh gaya konservatif

$$W_{nk} = W_p + (p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

Kenaikan energi dalam

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

Kenaikan energi kinetik

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} m(v_2^2 - v_1^2)$$

Kenaikan energi potensial

$$\Delta E_p = mg(Z_2 - Z_1) = W_k$$

Hukum pertama termodinamika bentuk umum menjadi

$$m(u_2 - u_1) + \frac{1}{2} m(v_2^2 - v_1^2) + mg(Z_2 - Z_1) = Q - W_p - (p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

jika ruas kiri dan kanan dibagi dengan massa  $m$  dan dengan memperhatikan bahwa  $V_1 = m v_1$  dan  $V_2 = m v_2$ , serta diadakan penyusunan lagi, maka hasilnya adalah

$$\left(u_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2} v_2^2 + gZ_2\right) - \left(u_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2} v_1^2 + gZ_1\right) = q - w_p \quad (5.68)$$

atau

$$\left(h_2 + \frac{1}{2} v_2^2 + gZ_2\right) - \left(h_1 + \frac{1}{2} v_1^2 + gZ_1\right) = q - w_p \quad (5.69)$$

Ini merupakan persamaan umum untuk aliran tunak. Selanjutnya persamaan umum ini akan diterapkan pada kasus-kasus yang lebih khusus.

## 1. Kalorimeter Aliran Tetap

Dalam kalorimeter aliran tetap, energi kinetik dan energi potensial sistem terhadap lingkungan dapat disamakan dengan nol dan tak ada usaha yang dilakukan oleh atau terhadap sistem. Karena itu Persamaan (5.69) menjadi

$$h_2 - h_1 = q \quad (5.70)$$

Ini berarti bahwa kalor yang diserap sama dengan kenaikan entalpi. Jika fluida itu adalah cairan, perubahan energi yang disebabkan oleh pemuaian (ekspansi) termal biasanya dapat diabaikan dan  $(h_2 - h_1) = c_p \Delta T \cong c_v \Delta T$ . Namun dalam hal gas, pemuaian ini harus diperhitungkan.

## 2. Kelep Berpori atau Katup Cekik

Peranti ini digunakan untuk mengurangi tekanan fluida yang mengalir tanpa melakukan usaha luar. Oleh karena pertukaran kalor dan usaha terhadap gravitasi biasanya tidak penting, maka Persamaan (5.69) menurun menjadi

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) \quad (5.71)$$

Dalam banyak hal, energi kinetik sebelum ekspansi juga dapat diabaikan, sehingga

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2}v_2^2 \quad (5.72)$$

Fluida itu mengalami penurunan tekanan yang besar dan timbullah sejumlah kecil energi kinetik. Dalam keadaan limit, bila terdapat pula gesekan yang cukup sehingga semua energi kinetik dapat diabaikan, maka akhirnya

$$h_2 = h_1 \quad (5.73)$$

## 3. Cerat (Nozzle)

Cerat atau nozel adalah kebalikan dari cekik. Cerat dibuat dengan tujuan untuk memperoleh kecepatan yang sebesar mungkin dengan cara mengusahakan supaya gesekan dan golkakan (tubulensi) tetap kecil. Jadi fluida masuk dengan kecepatan rendah dan keluar dengan kecepatan tinggi untuk lebih jelasnya silakan melihat pada Gambar 2.8. Usaha peranti  $w_p = 0$  dan juga  $q = 0$ . Perbedaan elevasi kecil, sehingga  $Z_2 = Z_1$ . Persamaan (2.69) menjadi

$$v_2^2 = v_1^2 + 2(h_1 - h_2) \quad (5.74)$$



**Gambar 5.8.** Aliran melalui cerat

Sering kali karena  $v_1$  kecil maka energi kinetik sebelum cerat juga kecil, sehingga boleh diabaikan. Persamaan (2.74) dapat dituliskan menjadi

$$v_2^2 = 2(h_1 - h_2) \quad (5.75)$$

Dalam mesin jet  $W$  dan  $Z$  dalam Persamaan (5.69) tidak penting. Bahan bakar memberikan kalor  $q$  yang besar, sehingga menaikkan nilai entalpi jenis gas yang telah diserapnya ke dalam sistem. Hal ini disertai pula dengan kenaikan tekanan yang tinggi. Fluida dengan entalpi tinggi ini kemudian mengalami ekspansi di dalam cerat dibagian belakang mesin, sementara itu entalpinya menurun dan energi diubah menjadi bentuk energi kinetik dalam gas yang keluar. Entalpi itu tak pernah turun menjadi sama dengan nilai semula tetapi seluruh proses cenderung menuju ke arah perubahan  $q$  seluruhnya menjadi energi kinetik.

#### 4. Turbin

Turbin dibuat dengan tujuan untuk memperoleh usaha luar yang sebesar mungkin. Suhu dalam turbin uap sebenarnya lebih tinggi dari pada suhu di ruang sekelilingnya, namun laju aliran demikian cepat sehingga secara rasio hanya sedikit saja kalor yang hilang pada setiap satuan massa uap. Oleh karena itu secara pendekatan dapat dianggap bahwa  $q = 0$ , sementara itu kedudukan atau elevasi tempat aliran masuk dan keluar tidak berbeda jauh, sehingga  $Z_1 = Z_2$ . Persamaan (5.69) menjadi

$$-w_p = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) \quad (5.76)$$

#### 5. Persamaan Bernoulli

Zat yang tak termampatkan dan tak kental mengalir melalui pipa yang luas tampang lintangnya tidak tetap atau sama dan elevasinya juga tidak sama di tempat-tempat yang berbeda. Usaha oleh peranti  $w_p = 0$  demikian pula dengan  $q = 0$ , sehingga Persamaan (5.69) menjadi

$$h_1 + \frac{1}{2}v_1^2 + gZ_1 = h_2 + \frac{1}{2}v_2^2 + gZ_2 = \text{tetap}$$

atau

$$u + pv + \frac{1}{2}v^2 + gZ = C$$

Perubahan energi dalam sistem sembarang proses sama dengan aliran kalor yang masuk ke dalam sistem dikurangi dengan jumlah usaha konfigurasi dan usaha disipatif. Untuk benda tegar atau fluida yang tak termampatkan (fluida ideal), usaha konfigurasi sama dengan nol karena volumenya tetap. Jika usaha disipatif dan aliran kalor keduanya sama dengan nol, seperti dalam kasus ini, maka energi dalamnya tetap, karena itu

$$pv + \frac{1}{2}v^2 + gZ = C$$

jika persamaan terakhir ini dibagi dengan  $v$  atau dikalikan dengan  $\rho$ , maka hasilnya adalah

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gZ = C \quad (5.77)$$

inilah persamaan Bernolulli untuk fluida yang tak termampatkan dan tak kental atau tak bergesekan.

## N. Contoh Soal



Contoh

5.1

Hitunglah usaha yang dilakukan terhadap atmosfer jika 10 kg air diubah menjadi uap yang volumenya 16,7 m<sup>3</sup>!

### Penyelesaian

*Diketahui:*  $V_1 = 10$  kg air

$$V_2 = 16,7 \text{ m}^3$$

*Ditanya:* Hitunglah usaha yang dilakukan terhadap atmosfer?

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*  $W = \int_{v_1}^{v_2} p \, dV = p \int_{v_1}^{v_2} dV = p(V_2 - V_1)$

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p \, dV = p \int_{v_1}^{v_2} dV = p(V_2 - V_1)$$

$$W = (1,01 \times 10^5 \text{ Pa})(16,7 - 0,01) \text{ m}^3 = 16,86 \times 10^5 \text{ J}$$

Periksa Kembali



Contoh

5.2

Uap pada tekanan tetap  $p = 30$  atm dimasukkan ke dalam silinder mesin uap. Panjang langkahnya  $l = 0,5$  m dan diameter silinder  $d = 0,4$  m. Berapakah besar usaha yang dilakukan oleh uap pada tiap langkah?

#### Penyelesaian

*Diketahui:*  $p = 30$  atm;  $l = 0,5$  m;  $d = 0,4$  m

*Ditanya:* Berapakah besar usaha yang dilakukan oleh uap pada tiap langkah?

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*  $W = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV = p(V_2 - V_1) = p\pi d^2 l / 4$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV = p(V_2 - V_1) = p\pi d^2 l / 4$$

$$W = (30 \times 1,01 \times 10^5 \text{ Pa})(0,5 \text{ m})(\pi)(0,4 \text{ m})^2 / 4 = 191637 \text{ J}$$

Periksa Kembali





Suatu gas sempurna mula-mula pada suhu  $T_1$  dan tekanan  $p_1$  dimampatkan secara reversibel hingga volumenya menjadi setengah kali volume semula. Suhu gas berubah selama pemampatan, sehingga setiap saat dipenuhi hubungan  $p = AV$ , dengan  $A$  suatu tetapan. (a) Gambarlah diagram proses itu pada bidang  $p$ - $V$ . (b) Hitunglah usaha yang dilakukan pada gas dalam besaran-besaran  $n$ ,  $R$  dan  $T_1$ !

### Penyelesaian

*Diketahui:*  $p = AV$

*Ditanya:* (a) Gambarlah diagram proses itu pada bidang  $p$ - $V$ .

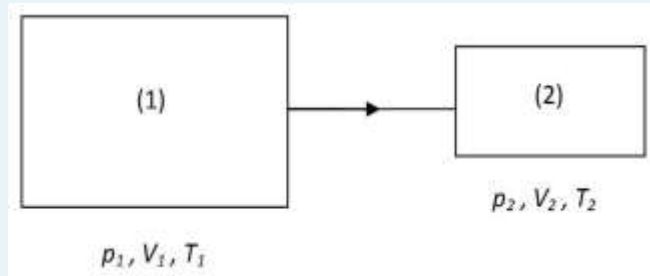
(b) Hitunglah usaha yang dilakukan pada gas dalam besaran-besaran  $n$ ,  $R$  dan  $T_1$ !

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*  $p = AV = \frac{nRT}{V} = \frac{nRT}{V^2} \times V = \frac{nRT_1}{V_1^2} \times V$

$$A = \frac{nRT}{V^2} = \frac{nRT_1}{V_1^2} = \text{tetap}$$

Perhatikan gambar diagram kotak yang melukiskan proses yang terjadi (Gambar 5.9), dan diagram proses pada bidang  $p$ - $V$  (Gambar 5.10).

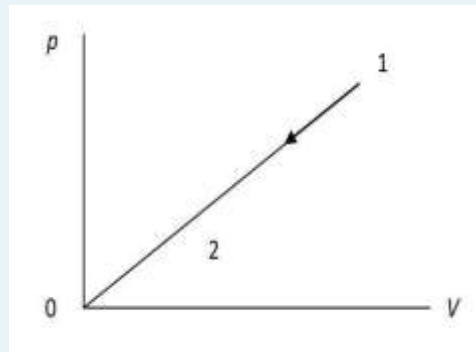


Gambar 5.9.

$$p = AV = \frac{nRT}{V} = \frac{nRT}{V^2} \times V = \frac{nRT_1}{V_1^2} \times V$$

$$A = \frac{nRT}{V^2} = \frac{nRT_1}{V_1^2} = \text{tetap}$$

(a) Diagram proses



Gambar 5.10. Diagram proses bidang  $p$ - $V$

(b) Usaha oleh gas

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV = A \int_{V_1}^{V_2} V \, dV = \frac{nRT_1}{V_1^2} \int_{V_1}^{V_2} V \, dV$$

$$W = \frac{nRT_1}{2V_1^2} (V_2^2 - V_1^2) = \frac{nRT_1}{2V_1^2} \left( \frac{1}{4} V_2^2 - V_1^2 \right) = -\frac{3}{8} nRT_1$$

Periksa  
Kembali



## O. Soal Latihan



Latihan

1

Suatu bejana volume  $10 \text{ m}^3$  berisi  $8 \text{ kg}$  gas oksigen pada suhu  $300 \text{ K}$ . Hitunglah usaha yang diperlukan untuk memperkecil volumenya menjadi  $5 \text{ m}^3$ , (a) pada tekanan tetap, (b) pada suhu tetap. (c) Berapakah suhu pada akhir proses di (a)? (d) Berapakah tekanan pada akhir proses di (b)? (e) Tunjukkan kedua proses dalam diagram  $p$ - $V$ !

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Jika suatu sistem berubah dari keadaan a ke keadaan b melalui lintasan a-c-b, kalor sebesar 80 J mengalir ke dalam sistem dan sistem melakukan usaha sebesar 30 J. Proses ini dapat dilihat pada Gambar 5.14 di bawah ini. (a) Berapa banyak kalor yang mengalir ke dalam sistem melalui lintasan a-d-b, jika usaha yang dilakukan oleh sistem itu 10 J? (b) Sistem kembali dari b ke a melalui lintasan lengkung. Usaha yang dilakukan pada sistem 20 J. Apakah sistem itu mengisap ataukah melepas kalor dan berapakah besarnya? (c) Jika  $U_a = 0$  dan  $U_d = 40$  J, hitunglah kalor yang diserap dalam proses a-d dan d-b!

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Sebuah sistem terdiri atas sebuah batu dengan massa 10 kg dan sebuah ember yang berisi 100 kg air. Mula-mula batu itu terletak 10,2 m di atas air dan suhu batu dan air adalah sama. Batu kemudian jatuh ke dalam air. Tentukanlah:  $\Delta U$ ,  $\Delta E_k$ ,  $\Delta E_p$ ,  $Q$  dan  $W$  untuk perubahan keadaan berikut.

- Batu tepat akan masuk ke dalam air.
- Batu tepat berhenti di dalam ember.
- Setelah terjadi perpindahan kalor ke dalam lingkungan, sedemikian rupa sehingga suhu batu dan air sama seperti semula.

#### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Sebuah bejana dengan volume  $5 \text{ m}^3$  berisi  $0,05 \text{ m}^3$  air dan  $4,95 \text{ m}^3$  uap jenuh pada tekanan  $0,1 \text{ MPa}$ . Sistem dipanaskan hingga semuanya menjadi uap. Tentukanlah  $Q$ , bila diketahui volume jenis air  $0,001043 \text{ m}^3/\text{kg}$ , volume jenis uap  $1,694 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Pada tekanan  $0,1 \text{ MPa}$  energi dalam jenis air  $417,36 \text{ kJ/kg}$ , energi dalam jenis uap  $2506,1 \text{ kJ/kg}$ . Setelah menjadi uap semua energi dalam jenisnya adalah  $2600,5 \text{ kJ/kg}$ .

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Gas memuai melalui hubungan  $pV^{1,2} = \text{konstan} = C$ . Volume dan tekanan gas mula-mula adalah  $0,5 \text{ m}^3$  dan  $5 \times 10^5 \text{ Pa}$ . Volume akhir adalah  $1 \text{ m}^3$ . Hitung usaha yang dilakukan oleh gas.

**Penyelesaian**

*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali





Pada suatu proses, energi dalam turun 500 kJ/kg dan 230 kJ/kg usaha dilakukan pada sistem. Tentukan kalor yang dipindahkan, kalor dilepaskan ataukah diserap oleh sistem?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Oksigen dalam silinder dikompres dari tekanan mula-mula 100 kPa ke tekanan 600 kPa secara ( $\gamma = 1,4$ ). Suhu dan volume mula-mula masing-masing adalah 15 °C dan 0,2 m<sup>3</sup>. Tentukan: (a) massa udara dalam silinder (b) usaha yang dilakukan.

**Penyelesaian**

*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali

## P. Tugas



Tugas

1

Kalor jenis molar  $c_p$  kebanyakan zat, kecuali pada suhu yang sangat rendah, dapat dinyatakan dalam persamaan

$$c_p = a + 2bT - cT^{-2}$$

$a$ ,  $b$  dan  $c$  adalah tetapan. (a) Berapakah kalor yang diperlukan untuk menaikkan  $n$  mol zat pada tekanan tetap dari  $T_1$  ke  $T_2$ ? (b) Berapakah kalor jenis rata-rata antara  $T_1$  dan  $T_2$ ? (c) Untuk magnesium  $a = 25,7 \times 10^3$ ,  $b = 3,13$ , dan  $c = 3,27 \times 10^8$  jika  $c_p$  dinyatakan dalam  $\text{J kmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Hitunglah  $c_p$  magnesium pada suhu 300 K dan  $c_p$  rata-rata antara 300 K dan 500 K!

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Seorang pengemudi menjalankan mobilnya, massa 1350 kg, menuruni bukit dan melihat lampu merah di dasar bukit sebagai tanda harus berhenti. Kecepatan pada saat itu 28 m/s dan mobil berada pada jarak vertikal 30 m dari dasar bukit. Berapakah besar energi kalor yang timbul karena pengereman ini, jika angin dan efek gesekan yang lain diabaikan?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Sebuah silinder dilengkapi dengan piston di dalamnya yang dapat bergerak bebas. Mula-mula piston ada di tengah dan tiap bagian silinder berisi 1 kmol gas sempurna yang sama pada suhu 300 K dan tekanan 100 kPa. Pada setengah bagian yang kiri terdapat pula sebuah pemanas listrik, sehingga suhu bagian kiri ini secara perlahan-lahan naik menjadi 450 K. Bila silinder dan piston adalah isolator sempurna dan kapasitas kalornya dapat diabaikan, hitunglah banyaknya kalor yang ditambahkan pada sistem oleh pemanas ini. Diketahui kalor jenis molar gas ini  $c_v = 12,7 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$  dan  $c_p = 20,9 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ .

#### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Suatu logam mempunyai massa relatif atom 30 dan massa jenis atau rapatnya  $3200 \text{ kg/m}^3$ . Kalor peleburnya  $l_{pc} = 4 \times 10^5 \text{ J/kg}$  pada titik leburnya, yaitu 900 K. Kalor penguapnya  $l_{cu} = 1,2 \times 10^7 \text{ J/kg}$  pada titik didihnya, yaitu 1300 K. Kalor jenis (padat) pada tekanan tetap  $c_p = 750 + 0,5 T$  dan  $c_p$  cair = 1200, keduanya dalam satuan  $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ . (a) Buatlah grafik suhu sebagai fungsi waktu untuk 10 g logam ini bila dipanasi dengan laju 1 W dari 300 K sampai dengan 1200 K. (b) Tentukanlah jumlah kalor yang diperlukan!

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Tekanan ban sebuah mobil pada awal perjalanan 270 kPa. Setelah menempuh perjalanan selama 3 jam, tekanan ban menjadi 300 kPa. Berapakah perubahan energi dalam udara dalam ban, jika udara dianggap sebagai gas sempurna? Diketahui  $c_v = 20,88 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$  dan volume ban dianggap tetap, yaitu  $57 \text{ dm}^3$ .

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali





### A. Persamaan Fungsi Energi $T$ - $v$ , $T$ - $p$ dan $p$ - $v$

#### 1. Persamaan Energi untuk variabel bebas $T$ dan $v$

Andaikan suatu sistem  $p$ - $v$ - $T$  mengalami rentetan keadaan seimbang tak berhingga banyak, setiap saat keadaan seimbang itu hanya menyimpang sedikit dari keadaan seimbang sebelumnya, maka proses tersebut merupakan proses kuasistatik. Jika energi dalam  $u$  dipilih sebagai fungsi  $T$  dan  $v$ , maka pada perubahan suhu  $dT$  dan perubahan volume  $dv$ , perubahan energi dalam  $du$  adalah :

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv \quad (6.1)$$

Turunan parsial  $\left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$  adalah arah (*slope*) pada grafik  $u = u(T)$  pada proses isokhorik dan  $\left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T$  adalah arah pada grafik  $u = u(v)$  pada proses isotermal. Hukum pertama untuk proses reversibel:

$$\delta q = du + p dv \quad (6.2)$$

Jika Persamaan (6.1) dimasukkan ke Persamaan(6.2) diperoleh

$$\delta q = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] dv \quad (6.3)$$

Pada proses isokhorik,  $v = C$  atau  $dv = 0$  dan  $\delta q = c_v dT$ , sehingga

$$c_v dT_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT_v$$

atau

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (6.4)$$

Dapat disimpulkan bahwa kalor jenis  $c_v$  dapat ditentukan dari arah grafik  $u = u(T)$  atau arah garis isokhorik pada bidang  $u$ - $T$ - $v$ . Jika Persamaan (6.4) dimasukkan ke dalam Persamaan (6.3) diperoleh

$$\delta q = c_v dT + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] dv \quad (6.5)$$

Pada proses isobarik,  $\delta q = c_p dT$  dan Persamaan (6.5) menjadi:

$$c_p dT_p = c_v dT_p + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] dv_p$$

atau

$$(c_p - c_v) = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (6.6)$$

Ruas kanan dapat ditentukan dari Persamaan keadaannya.  $\left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \beta v$ , sehingga

Persamaan (6.6) dapat diubah menjadi

$$\left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = \frac{c_p - c_v}{\beta v} - p \quad (6.7)$$

Pada proses isothermal,  $dT = 0$  dan Persamaan (6.5) menjadi

$$\delta q_T = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] dv_T \quad (6.8)$$

Persamaan ini menyatakan bahwa kalor yang diberikan pada sistem dalam proses isothermal reversibel sama dengan jumlah usaha yang dilakukan oleh sistem dengan kenaikan energi dalamnya. Jika Persamaan (6.7) dimasukkan ke dalam Persamaan (6.8) akan diperoleh hasil

$$\delta q_T = \frac{c_p - c_v}{\beta v} dv_T \quad (6.9)$$

Pada proses adiabatik,  $\delta q = 0$ , dan Persamaan (6.5) menjadi

$$c_v \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_q = - \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] \quad (6.10)$$

Dalam pembahasan berikutnya akan diketahui bahwa proses adiabatik reversible adalah identik dengan proses isentropik, yaitu proses dengan entropi  $s$  tetap. Oleh karena itu Persamaan (6.10) dapat diubah menjadi

$$c_v \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_s = - \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] \quad (6.11)$$

Jika Persamaan (6.7) dimasukkan ke dalam Persamaan (6.11) diperoleh

$$c_v \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_s = \frac{c_v - c_p}{\beta v}$$

Atau

$$\left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_s = \frac{c_v - c_p}{\beta v c_v} \quad (6.12)$$

## 2. Persamaan Energi untuk variabel bebas $T$ dan $p$

Sepertihalnya energi dalam  $u$ , entalpi  $h$  zat murni adalah fungsi keadaan, dan dapat dinyatakan sebagai fungsi dua variabel saja dari tiga variabel  $p, v$  dan  $T$ . Sebagai fungsi  $T$  dan  $p$ , maka perubahan  $h$  untuk proses yang tak terhingga kecil, adalah

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T dp \quad (6.13)$$

dari definisi

$$h = u + p v$$

maka

$$dh = du + p dv + v dp = \delta q + v dp$$

Jadi

$$\delta q = dh - v dp \quad (6.14)$$

Jika Persamaan (6.13) dimasukkan ke dalam Persamaan (6.14) diperoleh

$$\delta q = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T - v \right] dp \quad (6.15)$$

Pada proses isobarik,  $dp = 0$  dan  $\delta q = c_p dT$ , sehingga dengan demikian Persamaan (6.15) menjadi

$$c_p dT_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT_p$$

atau

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (6.16)$$

Persamaan (6.4) dan Persamaan (6.16) perlu dicermati. Dari Persamaan (6.4)

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v, \text{ janganlah diambil kesimpulan bahwa } c_p = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p. \text{ yang benar } c_p$$

adalah seperti yang tercantum pada Persamaan (6.16). Jika selanjutnya Persamaan (6.16) dimasukkan ke dalam Persamaan (6.15) diperoleh

$$\delta q = c_p dT + \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T - v \right] dp \quad (6.17)$$

Pada proses isokhorik,  $\delta q = c_v dT$ , sehingga Persamaan (6.17) menjadi

$$c_v dT_v = c_p dT_v + \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T - v \right] dp_v$$

atau

$$c_p - c_v = - \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T - v \right] \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \quad (6.18)$$

Untuk proses isothermal,  $dT = 0$  sehingga Persamaan (6.17) menjadi

$$\delta q_T = \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T - v \right] dp_T \quad (6.19)$$

Akhirnya pada proses adiabatik,  $\delta q = 0$  dan dari Persamaan (6.17) dapat diperoleh

$$c_p \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = - \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T - v \right] \quad (6.20)$$

Sebagai fungsi dari variabel bebas  $T$  dan  $p$  maka perubahan  $u$  dan perubahan  $v$  ialah

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T dp \quad (6.21)$$

$$dv = \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T dp \quad (6.22)$$

Jika Persamaan (6.21) dan (6.22) dimasukkan ke dalam hukum pertama

$$\delta q = du + p dv$$

dan diadakan penyusunan kembali, akan diperoleh

$$\delta q = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p + p \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dT + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \right] dp \quad (6.23)$$

Pada proses isobarik,  $dp = 0$  dan  $\delta q = c_p dT$ , Persamaan (6.23) menjadi

$$c_p = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p + p \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (6.24)$$

Jika Persamaan (6.24) dimasukkan ke dalam Persamaan (6.23) diperoleh

$$\delta q = c_p dT + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \right] dp \quad (6.25)$$

Pada proses isokhorik,  $\delta q_v = c_v dT$  dan jika dimasukkan ke dalam Persamaan (6.25) diperoleh

$$c_v dT_v = c_p dT_v + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \right] dp_v \quad (6.26)$$

Selanjutnya dapat diubah menjadi

$$c_p - c_v = - \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \right] \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \quad (6.27)$$

Dicari dahulu

$$\left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = - \frac{\left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p}{\left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T} = - \frac{\beta v}{-\kappa v} = \frac{\beta}{\kappa} \quad (6.28)$$

Masukkan Persamaan (6.28) ke dalam Persamaan (6.27)

$$c_p - c_v = - \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \right] \frac{\beta}{\kappa}$$

Selanjutnya dapat disusun menjadi

$$\left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = - \frac{\kappa}{\beta} (c_p - c_v) \quad (6.29)$$

Pada proses isothermal,  $dT = 0$  sehingga Persamaan (6.25) menjadi

$$\delta q_T = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \right] dp_T \quad (6.30)$$

Jika Persamaan (6.29) dimasukkan ke dalam Persamaan (6.30) akan diperoleh

$$\delta q_T = \frac{\kappa}{\beta} (c_v - c_p) dp_T \quad (6.31)$$

Pada proses adiabatik,  $\delta q = 0$  Persamaan (6.25) menjadi

$$c_p dT_q = - \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \right] dp_q$$

atau

$$c_p \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_q = - \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \right] \quad (6.32)$$

dengan mengingat Persamaan (6.29), dapat diubah menjadi

$$c_p \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_q = \frac{\kappa}{\beta} (c_p - c_v)$$

atau

$$\left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_q = \frac{\kappa}{\beta} \frac{(c_p - c_v)}{c_p} \quad (6.33)$$

Akhirnya perlu ditambahkan bahwa Persamaan (6.24) dapat pula diubah menjadi

$$\left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p = c_p - \beta p v \quad (6.34)$$

### 3. Persamaan Energi untuk variabel bebas $p$ dan $v$

Perubahan energi dalam  $u$  dan entalpi  $h$  jika tekanan dan volume berubah dengan  $dp$  dan  $dv$  adalah

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_v dp + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_p dv \quad (6.35)$$

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_v dp + \left(\frac{\partial h}{\partial v}\right)_p dv \quad (6.36)$$

Selanjutnya berdasarkan rumus yang diterapkan dalam sistem  $p$ - $v$ - $T$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v$$

dimana  $\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v = c_v$  dan  $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v = \frac{\kappa}{\beta}$  sehingga

$$\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_v = c_v \frac{\kappa}{\beta} \quad (6.37)$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial v}\right)_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p$$

karena  $\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = c_p$  dan  $\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p = \frac{1}{\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p} = \frac{1}{\beta v}$ , maka

$$\left(\frac{\partial h}{\partial v}\right)_p = \frac{c_p}{\beta v} \quad (6.38)$$

Rumus-rumus berikut mudah dijabarkan

$$\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_p = \frac{c_p}{\beta v} - p \quad (6.39)$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_v = v + \frac{\kappa c_v}{\beta} \quad (6.40)$$

$$\delta q_T = \frac{\kappa c_v}{\beta} dp_T + \frac{c_p}{\beta v} dv_T \quad (6.41)$$

$$c_v \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s = c_p \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T \quad (6.42)$$

## B. Energi Dalam Gas

Pada Bab VIII akan dibuktikan bahwa

$$p + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{T\beta}{\kappa} \quad (6.43)$$

Untuk gas sempurna:  $pv = RT$ , atau  $p = RT/v$  sehingga  $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v}$ .

Jadi 
$$p + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = \frac{RT}{v} = p$$

atau

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = 0 \quad (6.44)$$

Pada persamaan di atas dapat dilihat bahwa untuk gas sempurna energi dalam  $u$  tidak bergantung pada volume.  $\partial u$  adalah perubahan  $u$  jika  $v$  berubah dengan  $\partial v$  pada suhu tetap. Karena hasil baginya sama dengan nol, maka  $\partial u = 0$ , ini berarti bahwa walaupun volumenya berubah tetapi tetap  $u$  tidak berubah. Dengan perkataan lain  $u$  bukan fungsi  $v$ , dan tentunya juga bukan fungsi dari massa jenis  $\rho$ , sebab  $\rho = 1/v$ .

Selanjutnya akan ditinjau bagaimana  $u$  berubah dengan  $p$ . Dari rumus turunan parsial, telah didapatkan bahwa

$$\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T = \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$$

Ruas kanan sama dengan nol, karena menurut Persamaan (6.44) faktor pertama pada ruas kanan ini sama dengan nol. Jadi ruas kiripun sama dengan nol. Analog dengan yang telah dijelaskan diatas, maka energi dalam  $u$  gas sempurna tidak tergantung pada tekanan  $p$  atau bukan merupakan fungsi dari  $p$ . Dengan perkataan lain  $u$  hanya merupakan fungsi dari  $T$  saja. Secara kualitatif hal ini dapat dijelaskan bahwa molekul-molekul gas sempurna tidak tarik menarik, sehingga tidak memiliki energi potensial dalam, walaupun memiliki energi potensial elastik. Oleh sebab itu, energi dalam gas sempurna hanya terdiri atas energi kinetik molekul-molekul dan energi potensial elastik saja yang tidak terpengaruh oleh tekanan dan volume, melainkan hanya dipengaruhi oleh suhu saja. Semakin tinggi suhu gas maka molekul-molekulnya bergerak dengan kelajuan lebih tinggi, sehingga energi kinetiknya juga semakin tinggi. Oleh karena itu maka rumus

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$$

Dapat dituliskan

$$c_v = \frac{du}{dT} \quad (6.45)$$

atau

$$du = c_v dT$$

Jika diintegrasikan



$$\int_{u_1}^{u_2} du = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT$$

Jika  $c_v = \text{tetap}$ , maka

$$u_2 = u_1 + c_v (T_2 - T_1) \quad (6.46)$$

Untuk gas Van der Waals

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v-b}$$

Hasil ini dimasukkan dalam Persamaan (6.43)

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = \frac{RT}{v-b} - p = \frac{a}{v^2} \quad (6.47)$$

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv = c_v dT + \frac{a}{v^2} dv$$

Bila diintegrasikan dengan batas yang sesuai, diperoleh

$$u_2 = u_1 + c_v(T_2 - T_1) + \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \quad (6.48)$$

### C. Selisih Kalor Jenis

Pada Persamaan (6.7) diperoleh,

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = \frac{c_p - c_v}{\beta v} - p$$

Untuk gas sempurna, ruas kiri sama dengan nol, sehingga

$$c_p - c_v = \beta v p \quad (6.49)$$

tetapi untuk gas sempurna  $\beta = \frac{1}{T}$ , sehingga

$$c_p - c_v = R \quad (6.50)$$

Untuk gas Van der Waals ruas kiri pada Persamaan (6-7) sama dengan  $a/v^2$ , sehingga

$$\frac{a}{v^2} = \frac{c_p - c_v}{\beta v} - p$$

atau

$$c_p - c_v = \beta v \left( p + \frac{a}{v^2} \right) \quad (6.51)$$

untuk gas Van der Waals, koefisien muai volume

$$\beta = \frac{Rv^2 (v-b)}{RTv^3 - 2a(v-b)^2}$$

Sehingga Persamaan (6.51) menjadi,

$$c_p - c_v = \frac{R}{1 - \frac{2a(v-b)^2}{RTv^3}} \quad (6.52)$$

#### D. Proses Adiabatik

Telah didapatkan seperti Persamaan (6.5), bahwa

$$\partial q = c_v dT + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] dv$$

Jika sistem menjalani proses adiabatik, yaitu proses tanpa adanya panas yang mengalir masuk atau keluar dari sistem, maka  $\partial q = 0$ .

Persamaan di atas menjadi

$$c_v dT_q = - \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] dv_q$$

Untuk gas sempurna, karena  $\left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = 0$ , maka

$$c_v dT_q = -p dv_q = - \frac{RT}{v} dv_q$$

Selanjutnya dapat ditulis dalam bentuk

$$\frac{dT}{T} + \frac{R}{c_v} \frac{dv}{v} = 0$$

Kalau diintegrasikan diperoleh

$$\ln T + \frac{R}{c_v} \ln v = \ln C$$

Ini berarti bahwa

$$Tv^{R/c_v} = C \quad (6.53)$$

Selanjutnya akan didefinisikan suatu besaran tak berdimensi, yaitu yang disebut tetapan Laplace,  $\gamma$ .

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (6.54)$$

Untuk gas sempurna  $R/c_v = (c_p - c_v)/c_v = \gamma - 1$ , sehingga kalau dimasukkan ke dalam Persamaan (6.53) diperoleh

$$TV^{\gamma-1} = C \quad (6.55)$$

Persamaan (6.55) berlaku untuk gas sempurna yang menjalani proses adiabatik dalam variabel  $T$  dan  $v$ . Oleh karena antara variabel-variabel  $p$ ,  $v$  dan  $T$  ada hubungan fungsi, maka Persamaan (6.55) dapat diubah dan dinyatakan dalam variabel  $p$  dan  $v$  ataupun variabel  $p$  dan  $T$ . Caranya ialah dengan mengeleminasi variabel yang tidak dikehendaki dari Persamaan keadaannya. Misalnya  $T = \frac{pv}{R}$ , masukkan ke dalam Persamaan (6.55)

sehingga diperoleh  $\frac{pv}{R} v^{\gamma-1} = C$ , atau  $pv^\gamma = RC$ . Tetapi  $RC$  adalah tetapan kali tetapan hasilnya juga bilangan tetap dan dinamakan saja  $C$  (walaupun mungkin nilainya lain). Jadi

$$pv^\gamma = C \quad (6.56)$$

Untuk menyatakannya dalam variabel  $p$  dan  $T$  maka harus dieleminasi. Dari Persamaan keadaannya dapat diperoleh  $v = \frac{RT}{p}$ , lalu masukkan ke dalam Persamaan (6.56) yang langsung dapat dituliskan sebagai

$$pT^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = C \quad (6.57)$$

Usaha oleh gas sempurna pada proses adiabatik dapat dicari sebagai berikut,

$$\begin{aligned} w &= \int_{v_1}^{v_2} p \, dv = C \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v^\gamma} = \frac{C}{1-\gamma} [v_2^{1-\gamma} - v_1^{1-\gamma}] \\ w &= \frac{p_2 v_2^\gamma v_2^{1-\gamma}}{1-\gamma} - \frac{p_1 v_1^\gamma v_1^{1-\gamma}}{1-\gamma} = \frac{1}{1-\gamma} [p_2 v_2 - p_1 v_1] \end{aligned}$$

Jadi usaha oleh satu mol gas sempurna

$$w = \frac{1}{1-\gamma} [P_2 v_2 - P_1 v_1] \quad (6.58)$$

Mudah dibuktikan bahwa usaha ini dapat dinyatakan dalam bentuk lain, yaitu

$$w = \frac{R}{1-\gamma} [T_2 - T_1] \quad (6.59)$$

dan

$$w = c_v [T_1 - T_2] \quad (6.60)$$

Dari hukum pertama termodinamika  $u_2 - u_1 = q - w$ , sehingga kalau gas itu mengalami proses adiabatik maka

$$w = u_2 - u_1 = c_v [T_2 - T_1] \quad (6.61)$$

Proses adiabatik ialah proses yang dialami gas tanpa menerima dan melepas kalor.

### E. Mesin Kalor dan Mesin Pendingin (Refrigerator)

Sejumlah proses yang membawa sistem kembali ke keadaan semula disebut daur atau siklus. Dikatakan bahwa sistem menjalani proses siklus. Pada tiap bagian proses itu dapat terjadi aliran kalor yang masuk atau keluar dari sistem, dan dapat pula terjadi bahwa sejumlah usaha dilakukan oleh atau terhadap sistem, bila kalor yang masuk kedalam sistem lebih besar daripada panas yang keluar dari sistem dan usaha dilakukan oleh sistem, maka sistem itu disebut mesin kalor (*heat engine*). Sebaliknya bila kalor yang keluar dari sistem lebih besar dan usaha dilakukan terhadap sistem, maka sistem disebut *refrigerator*.

Mesin kalor dan mesin pendingin (refrigerator) diacu sebagai pompa kalor. Dengan mesin kalor kita dapat mempunyai sistem yang bekerja dalam siklus dan menghasilkan usaha positif netto dan perpindahan positif netto. Dengan menggunakan pompa kalor kita dapat mempunyai sistem yang bekerja dalam siklus dan kalor dapat dipindahkan dari suhu rendah ke suhu tinggi meskipun usaha dibutuhkan untuk melakukan ini. Untuk usaha dari sebuah siklus termodinamik membutuhkan beberapa persyaratan yaitu:

- Zat pelaku usaha
- Sebuah mesin
- Reservoir kalor bersuhu tinggi
- Reservoir kalor bersuhu rendah
- Pompa

Usaha netto dalam siklus adalah keluaran (output), dan panas yang diserap oleh zat pelaku usaha (*working substance*) adalah masukan. Bila  $Q_2$  adalah kalor yang masuk dan  $Q_1$  adalah kalor yang keluar dari sistem (mesin), sementara  $W$  adalah usaha yang dilakukan oleh mesin, efisiensi termal mesin didefinisikan sebagai

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_2|} \quad (6.62)$$

karena proses itu adalah siklik, maka  $\Delta U = 0$ , sehingga dari hukum pertama termodinamika diperoleh  $|W| = |Q_2| - |Q_1|$  dan Persamaan (6.62) menjadi

$$\eta = \frac{|Q_2| - |Q_1|}{|Q_2|} \quad (6.63)$$

atau

$$\eta = 1 - \frac{|Q_1|}{|Q_2|} \quad (6.64)$$

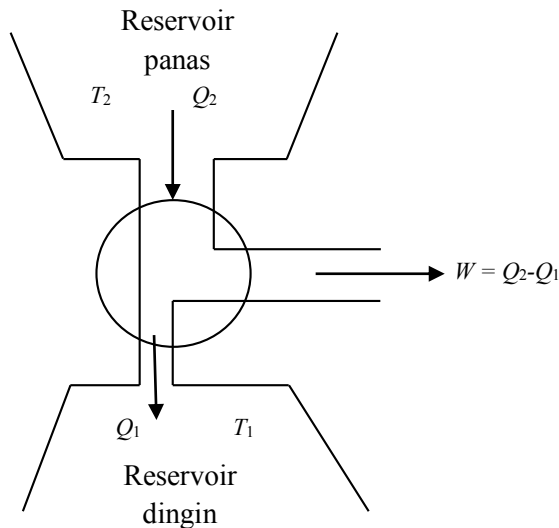
Persamaan (6.62) dapat diartikan bahwa efisiensi termal sebuah mesin sama dengan apa yang diperoleh,  $|W|$ , dibagi dengan apa yang harus dibeli,  $|Q_2|$ . Perlu dicermati bahwa efisiensi ini senantiasa kurang dari 100%, seperti tampak pada Persamaan (6.64).

Siklus termodinamik digolongkan menjadi dua yaitu siklus terbuka dan siklus tertutup. Siklus terbuka adalah siklus yang menggunakan atmosfer untuk melengkapi atau menutup siklus. Contohnya pembakaran siklus mesin yang menggunakan oksigen dari udara atmosfer untuk pembakaran dan hasil buangan dikembalikan ke atmosfer. Siklus dikatakan tertutup apabila zat usaha tidak pernah meninggalkan sistem kecuali kebocoran.

## 1. Mesin Kalor

Mesin kalor didefinisikan sebagai alat yang mengubah kalor menjadi energi mekanis. Tujuan mesin kalor ialah untuk menghasilkan usaha terus-menerus keluar, dengan cara melakukan siklus itu berulang-ulang. Pada mesin kalor selalu terdapat dua buah reservoir. Reservoir yang memberikan kalor besar disebut reservoir kalor,

sedangkan reservoir lainnya disebut reservoir dingin yang berfungsi menyerap kalor dalam jumlah yang besar tanpa terjadi perubahan panas berarti.



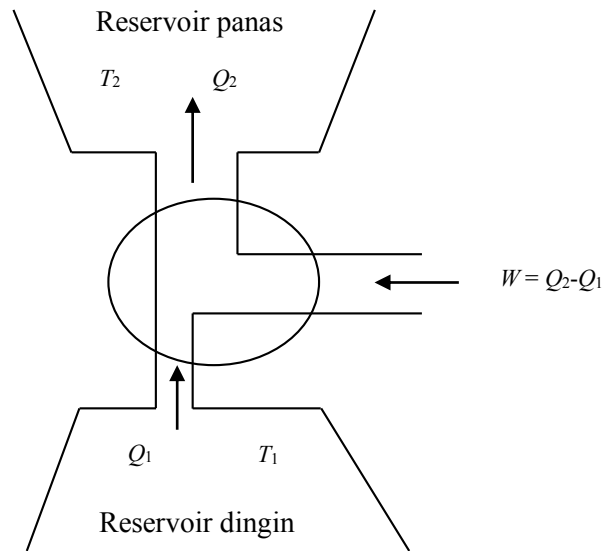
**Gambar 6.1.** Diagram alir mesin kalor

Perubahan energi dalam mesin kalor secara skematis diberikan pada Gambar 6.1. Lingkaran menggambarkan mesinnya sendiri. Kalor  $Q_2$  yang diberikan kepada mesin reservoir kalor adalah sebanding dengan luas penampang pipa. Kalor  $Q_1$  yang terbuang melalui saluran pembuangan ke reservoir dingin berbanding lurus dengan luas penampang pipa keluar. Sebagian kalor diubah menjadi usaha mekanis  $W$ . Kalor netto yang diserap adalah

$$Q = Q_2 - Q_1$$

## 2. Mesin Pendingin (Refrigerator)

Siklus usaha mesin pendingin berkebalikan dengan mesin kalor. Diagram alir mesin pendingin diberikan pada Gambar 6.2. Mesin pendingin mengambil kalor dari reservoir dingin dan kompresor memberikan usaha mekanis dan kemudian kalor dibuang ke reservoir kalor. Untuk satu kali siklus, kalor  $Q_1$  diambil dari reservoir dingin dan usaha dilakukan pada mesin pendingin  $W$  dan membuang  $Q_2$  ke reservoir kalor,  $W$  dan  $Q_2$  keduanya besarnya negatif, berdasarkan hukum pertama  $Q_2 = W + Q_1$



**Gambar 6.3.** Diagram alir mesin pendingin

Transformasi kalor menjadi usaha dapat diperoleh dari dua macam mesin, yaitu mesin bakar luar (*external combustion engine*), seperti mesin *stirling* dan mesin uap (*steam engine*), dan mesin bakar dalam (*internal combustion engine*), seperti mesin gasolin (bensin) dan mesin disel.

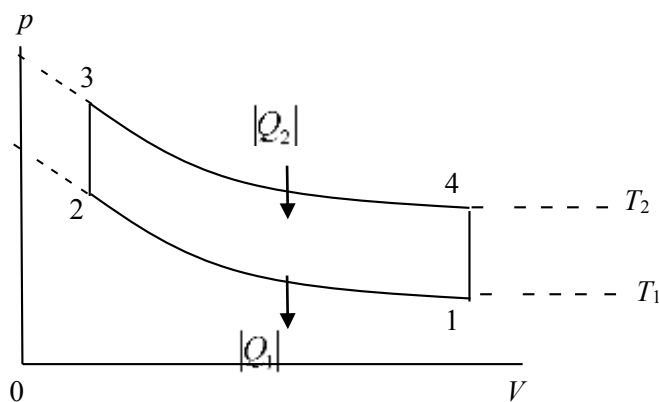
Dalam kedua jenis mesin ini, sejumlah gas atau campuran gas yang diisikan dalam sebuah silinder menjalani siklus sehingga oleh gerakan piston, maka poros menjalani gerak rotasi melawan gaya yang menahan. Pada saat-saat tertentu dalam siklus itu gas dalam silinder mengalami kenaikan suhu dan tekanan yang tinggi. Pada mesin *stirling* dan mesin uap, hal ini dicapai oleh adanya reaksi kimia antara bahan bakar dan udara yang terjadi dalam silinder itu sendiri. Dalam mesin bensin, pembakaran bensin dan udara berlangsung secara eksplosif (disertai ledakan) dengan perantaraan percikan listrik (*electric spark*). Sementara itu dalam mesin disel digunakan minyak sebagai bahan bakar dan pembakarannya berlangsung lebih lambat dengan cara menyemprotkan minyak ke dalam silinder. Dibawah ini akan diuraikan singkat tentang mesin Stirling dan mesin Carnot.

## F. Mesin Stirling dan Mesin Carnot

### 1. Mesin Stirling

Mesin ini sesuai namanya diciptakan oleh Robert Stirling dalam tahun 1816, sebelum termodinamika sendiri berkembang. Mesin udara panas (*heat air engine*) ini dapat mengubah sebagian dari energi yang dilepaskan oleh bahan bakar yang terbakar menjadi usaha. Setelah mesin uap dan mesin bakar dalam berkembang, mesin stirling tidak lagi banyak digunakan. Mesin ini sebenarnya mempunyai efisiensi yang tinggi, tetapi biaya pembuatannya mahal. Mesin dilengkapi dengan dua piston, yaitu piston ekspansi dan kompresi. Siklus terdiri atas dua isothermal dan dua isokhorik (Gambar 6.4).

Proses dari  $1 \rightarrow 2$  adalah proses kompresi (pemampatan) isothermal pada suhu  $T_1$ , kalor  $Q_1$  keluar dari sistem dan usaha dilakukan terhadap sistem. Proses dari  $2 \rightarrow 3$  adalah proses isokhorik, suhu naik dari  $T_1$  ke  $T_2$  dan tekanan juga naik dari  $p_2$  ke  $p_3$ . Tak ada usaha yang dilakukan. Proses dari  $3 \rightarrow 4$  merupakan proses ekspansi (pemuai) isothermal pada suhu  $T_2$ , kalor  $Q_2$  masuk ke dalam sistem, sementara usaha dilakukan oleh sistem. Akhirnya proses dari  $4 \rightarrow 1$  adalah proses isokhorik, suhu turun dari  $T_2$  ke  $T_1$  dan tekanannya juga turun dari  $p_4$  ke  $p_1$ . Tak ada usaha yang dilakukan karena volumenya tetap.



**Gambar 6.4.** Diagram skematik siklus stirling terdiri atas dua isothermal dan dua isokor



Proses dari 1 → 2 adalah proses isothermal pada  $T_1$ , sehingga tak ada perubahan energi dalam. Karena itu maka  $Q_1 = W_{1-2}$ , dan apabila zat pelaku usaha itu adalah gas sempurna, maka

$$Q_1 = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV = nRT_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = nRT_1 (\ln V_2 - \ln V_1)$$

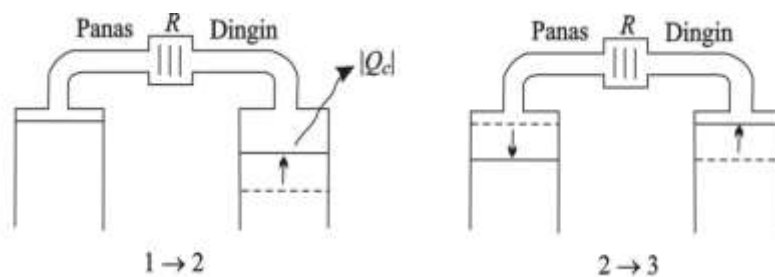
Pada proses 3 → 4 adalah juga isothermal pada  $T_2$ , sehingga

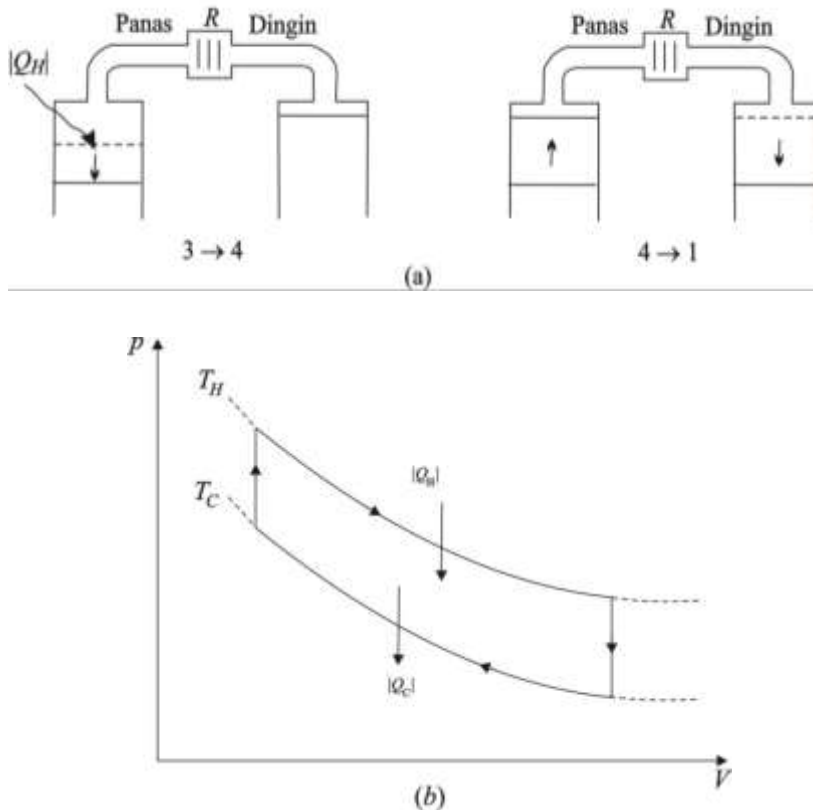
$$Q_2 = nRT_2 (\ln V_4 - \ln V_3) = nRT_2 (\ln V_1 - \ln V_2)$$

Dari kedua Persamaan ini, maka  $Q_1 / Q_2 = -T_1 / T_2$  dan kalau diambil nilai mutlaknya, menjadi  $T_1 / T_2$ . Oleh karena itu dengan Persamaan (6.64) diperoleh efisiensi mesin stirling

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (6.65)$$

Langkah bekerjanya mesin stirling yang agak diidealkan diperlihatkan secara skematis dalam Gambar 6.5a. Dua piston, yaitu piston pemuai di sebelah kiri dan piston pemampat di sebelah kanan dihubungkan pada poros yang sama. Ketika poros itu berputar, piston bergerak dengan fase yang berbeda, dengan pertolongan penghubung yang sesuai. Ruang antara kedua piston itu diisi dengan gas, dan bagian kiri ruang dijaga supaya tetap bersentuhan dengan reservoir panas (pembakar bahan bakar), sedangkan bagian kanannya bersentuhan dengan reservoir dingin. Di antara kedua bagian gas terdapat gawai  $R$ , yang disebut generator yang terdiri atas paking wol baja atau sederetan perintang logam yang kehantaran kalornya cukup rendah untuk menahan perbedaan temperatur antara ujung panas dan dingin tanpa hantaran kalor yang cukup berarti.





**Gambar 6.5.** (a) diagram skematik langkah usahamesin stirling yang diidealkan (nomor di bawah setiap diagram menyatakan proses yang diperlihatkan pada diagram  $PV$  dalam Gambar 6.5b. (b) Siklus mesin stirling yang diidealkan pada diagram  $PV$

Siklus Stirling terdiri atas empat proses seperti yang dilukiskan secara skematis dalam Gambar 6.5a dan menyangkut perubahan volume dan tekanan.

- 1→2 Ketika piston kiri tetap pada bagian atas, piston kanan sedang bergerak setengah jalan ke atas, memampatkan gas dingin yang bersentuhan dengan reservoir dingin, sehingga kalor sebesar  $[Q_C]$  keluar. Proses ini mendekati proses pemampatan isothermal hampiran dan digambarkan sebagai proses isothermal sempurna pada temperatur  $T_C$  dalam Gambar 6.5b.
- 2→3 Piston kiri bergerak ke bawah dan piston kanan ke atas, sehingga tidak terdapat perubahan volume, tetapi gas dipaksa melewati regenerator dari sisi dingin ke sisi panas dan memasuki bagian kiri yang bertemperatur lebih tinggi yaitu  $T_H$ .

untuk melaksanakan hal ini, regenerator harus memberikan kalor  $[Q_R]$  pada gas. Proses 2→3 berlangsung pada volume tetap.

3→4 Sekarang, piston kanan tetap stasioner ketika piston kiri bergerak ke bawah dan bersentuhan dengan reservoir panas, sehingga menyebabkan gas mengalami proses pemuaian isoterm hampiran, dan ketika itu kalor  $[Q_H]$  diserap pada temperature  $T_H$ , seperti pada Gambar 6.5b

4→1 Kedua piston bergerak dalam arah yang berlawanan, sehingga memaksa gas melewati regenerator dari sisi panas ke sisi dingin dan memberikan kalor yang hampir sama jumlahnya dengan  $[Q_R]$  ke generator yang diserap dalam proses 2→3. Proses ini berlangsung pada volume tetap.

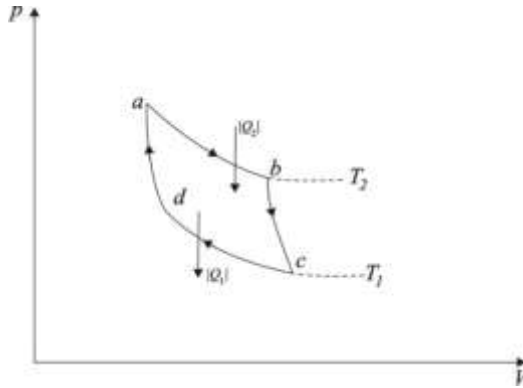
Perlu ditekankan bahwa Gambar 6.5b bersandar pada anggapan bahwa:

- Gas itu ideal
- Tidak ada kebocoran gas
- Tidak ada kalor yang keluar atau masuk melalui dinding silinder
- Tidak ada kalor yang dihantarkan melalui generator
- Tidak ada gesekan

## 2. Mesin Carnot

Carnot (1824) adalah orang pertama yang memperkenalkan suatu proses siklik sederhana ke dalam teori termodinamika yang sekarang dikenal sebagai siklus Carnot. Carnot tertarik sekali dalam meningkatkan efisiensi mesin uap. Namun perhatiannya tidak hanya tercurah pada masalah mekanis, tetapi lebih dicurahkan pada usaha untuk memahami asas-asas fisis mendasar yang menyangkut masalah efisiensi. Usaha Carnot ini dapat dikatakan sebagai landasan pengetahuan tentang termodinamika.

Siklus Carnot dapat dilaksanakan dengan sistem apapun, baik padat, cair atau gas, atau juga selaput permukaan serta zat parametrik. Bahkan sistem boleh juga mengalami perubahan fase selama siklus tersebut. Siklus Carnot untuk gas sempurna dapat dilihat pada Gambar 6.6, setelah diproyeksikan pada bidang  $p$ - $v$ . zat itu melakukan proses siklik yang terdiri atas 2 isotermal dan 2 adiabat. Dimulai dari titik  $a$  dan kembali lagi di  $a$ .



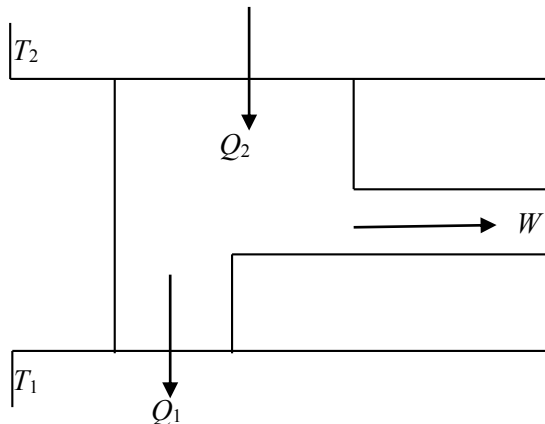
**Gambar 6.6.** Siklus Carnot

1. Ekspansi isothermal dari  $a$  ke  $b$  pada suhu  $T_2$ . Kalor  $Q_2$  masuk dan usaha dilakukan oleh sistem.
2. Ekspansi adiabatik dari  $b$  ke  $c$ , suhu turun menjadi  $T_1$  dan usaha dilakukan sistem.
3. Pemampatan isothermal pada suhu  $T_1$  dari  $c$  ke  $d$ . Kalor  $Q_1$  keluar dari sistem dan usaha dilakukan terhadap sistem.
4. Pemampatan adiabatik dari  $d$  ke  $a$ , suhu naik menjadi  $T_2$  dan usaha dilakukan terhadap sistem.

Dari hukum pertama, maka usaha total sistem adalah

$$W = (Q_2 - Q_1) - (U_2 - U_1) = Q_2 - Q_1$$

Sebab  $U_2 = U_1$  (siklik). Diagram aliran pada mesin Carnot dapat pula dilukiskan seperti Gambar 6.7 di bawah ini.



**Gambar 6.7.** Mesin Carnot

Sebagaimana yang telah dijelaskan di atas, definisi efisiensi mesin adalah

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_2|} = \frac{|Q_2| - |Q_1|}{|Q_2|} = 1 - \frac{|Q_1|}{|Q_2|} \quad (6.66)$$

Dimana

$W$  = Usaha keluaran oleh mesin, yang dapat dimanfaatkan.

$Q_2$  = Kalor masukan, yang harus dibayar.

$Q_1$  = Kalor keluaran, yang tidak berguna.

Jika arah proses dibalik, maka terjadilah mesin pendingin Carnot (*Carnot refrigerator*), sehingga arti besaran-besaran di atas menjadi,

$Q_1$  = Kalor yang diperoleh, yaitu energi panas yang dikeluarkan dari zat yang didinginkan.

$W$  = Usaha dari luar, yang harus dibayar.

$Q_2$  = Kalor yang dibuang ke reservoir dengan suhu yang lebih tinggi.

Pada refrigerator umumnya didefinisikan koefisien performansi (*coefficient of performance*) sebagai berikut:

$$\omega = \frac{|Q_1|}{|W|} = \frac{|Q_1|}{|Q_2| - |Q_1|} \quad (6.67)$$

Andaikan zat yang digunakan adalah gas sempurna, maka untuk proses isothermal dari  $a$  ke  $b$ , besar usahanya adalah

$$W_{ab} = nRT_2 \ln \frac{V_b}{V_a} \quad (6.68)$$

Proses dari  $b$  ke  $c$  adalah adiabatik,  $\delta Q = 0 = dU + \delta W$ . Jadi  $\delta W = -dU = -nc_v dT$ , yang bila diintegrasikan diperoleh

$$W_{bc} = nc_v(T_2 - T_1) \quad (6.69)$$

Proses dari  $c$  ke  $d$  isothermal pada  $T_1$  dan besar usahanya

$$W_{cd} = nRT_1 \ln \frac{V_d}{V_c}$$

Akhirnya proses dari  $d$  ke  $a$  adalah adiabatik dengan besar usaha

$$W_{da} = nc_v(T_1 - T_2) \quad (6.70)$$

$Q_2 = (U_b - U_a) + W_{ab} = W_{ab}$  (isothermal,  $U$  tetap). Demikian pula  $Q_1 = -W_{cd}$ , tanda negatif

karena  $W_{cd}$  negatif, sehingga ruas kiri maupun kanan menjadi positif. Dengan mengingat bahwa  $W_{da} = -W_{bc}$ , maka efisiensi mesin menjadi

$$\eta = \frac{\Sigma W}{Q_2} = \frac{nR(T_2 \ln \frac{V_b}{V_a} + T_1 \ln \frac{V_d}{V_c})}{nRT_2 \ln \frac{V_b}{V_a}}$$

$$\eta = \frac{T_2 \ln \frac{V_b}{V_a} + T_1 \ln \frac{V_d}{V_c}}{T_2 \ln \frac{V_b}{V_a}} \quad (6.71)$$

Dari kedua proses adiabatik, dapat diperoleh

$$T_2 V_b^{\gamma-1} = T_1 V_c^{\gamma-1} \quad \text{dan} \quad T_2 V_a^{\gamma-1} = T_1 V_d^{\gamma-1}$$

Dari kedua Persamaan terakhir ini dapat diperoleh

$$\frac{V_d}{V_c} = \frac{V_a}{V_b} \quad \text{atau} \quad \ln \frac{V_d}{V_c} = \ln \frac{V_a}{V_b} \quad \text{atau} \quad \ln \frac{V_d}{V_c} = -\ln \frac{V_b}{V_a}$$

Bila hasil terakhir ini dimasukkan ke Persamaan (6.71) akan diperoleh

$$\eta = \frac{T_2 \ln \frac{V_b}{V_a} - T_1 \ln \frac{V_b}{V_a}}{T_2 \ln \frac{V_b}{V_a}}$$

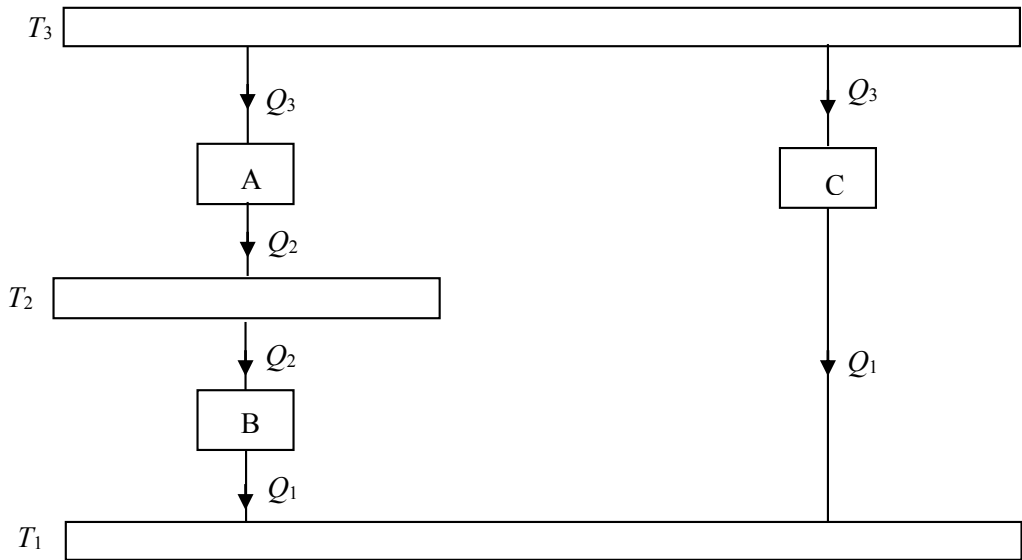
$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (6.72)$$

## G. Skala Suhu Mutlak

Telah diketahui bahwa hukum ke nol termodinamika memberikan dasar untuk pengukuran suhu. Pada umumnya skala suhu sangat tergantung pada zat termometriknya. Suatu skala suhu yang bebas dari ketergantungan akan zat termometrik disebut skala suhu mutlak. Selanjutnya pada pembahasan tentang siklus Carnot diketahui bahwa efisiensi termalnya tak tergantung pada zat pelakunya, melainkan hanya tergantung pada suhu reservoir saja. Hal ini tampak pada Persamaan (6.72). Kenyataan ini memberikan dasar untuk pembuatan skala suhu mutlak, dan yang akan kita namakan skala suhu termodinamik.

Gambar (6.8) menunjukkan tiga buah mesin Carnot A, B, dan C yang beroperasi pada tiga reservoir dengan suhu  $T_1, T_2$ , dan  $T_3$ . Dengan mengingat akan definisi dan rumus untuk efisiensi termalnya, maka

$$\frac{|Q_1|}{|Q_2|} = f(T_1, T_2) \quad \frac{|Q_2|}{|Q_3|} = f(T_2, T_3) \quad \frac{|Q_1|}{|Q_3|} = f(T_1, T_3)$$



**Gambar 6.8.** Tiga buah siklus Carnot

Dengan menghilangkan tanda nilai mutlak, maka

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{Q_1}{Q_2} \cdot \frac{Q_2}{Q_3}$$

atau

$$f(T_1, T_3) = f(T_1, T_2) \cdot f(T_2, T_3) \quad (6.73)$$

ruas kiri hanya merupakan fungsi  $T_1$  dan  $T_3$  saja, sehingga ruas kananpun harus merupakan fungsi  $T_1$  dan  $T_3$  saja. Agar hal ini dipenuhi, maka

$$f(T_1, T_2) = \frac{f(T_1)}{f(T_2)} \quad f(T_2, T_3) = \frac{f(T_2)}{f(T_3)}$$

jadi

$$\frac{Q_1}{Q_3} = f(T_1, T_3) = \frac{f(T_1)}{f(T_2)} \times \frac{f(T_2)}{f(T_3)} = \frac{f(T_1)}{f(T_3)} \quad (6.74)$$

Lord Kelvin memilih  $f(T_1) = T_1 = T_e$  = titik es dan  $f(T_3) = T_3 = T_u$  = titik uap. Jadi efisiensi termal mesin Carnot (mesin C) adalah

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_3} = 1 - \frac{T_e}{T_u} \quad (6.75)$$

Efisiensi termal yang diperoleh adalah kira-kira 26,80%. Oleh karena itu,

$$\frac{T_e}{T_u} = 0,7320 \quad (6.76)$$

Telah diketahui  $T_u - T_e = 100$

$$(6.77)$$

Dari kedua Persamaan terakhir ini diperoleh

$$T_e = 273,15 \text{ K}$$

$$T_u = 373,15 \text{ K}$$

## H. Contoh Soal



Contoh

6.1

Persamaan keadaan suatu gas :  $(p + b)v = RT$  dan energi dalam jenisnya:  $u = aT + bv + \mu_0$ . (a). Carilah  $c_v$  (b). Buktikanlah bahwa  $c_p - c_v = R$  (c). Buktikanlah pula bahwa untuk proses adiabatik maka  $Tv^{\frac{R}{c_v}} = C$  (tetap)

### Penyelesaian

*Diketahui:* gas:  $(p + b)v = RT$  dan energi dalam jenisnya:  $u = aT + bv + \mu_0$

*Ditanya:* (a) Carilah  $c_v$

(b) Buktikanlah bahwa  $c_p - c_v = R$

(c) Buktikanlah pula bahwa untuk proses adiabatik maka

$$Tv^{\frac{R}{c_v}} = C \text{ (tetap)}$$

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

(a) Kalor jenis pada volume tetap

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = a$$

(b)  $\left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = \frac{c_p - c_v}{\beta v} - p$ . Jadi  $b = \frac{c_p - c_v}{\beta v} - p$  (A)

$$\beta v = \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{R}{p + b}$$

Bila Persamaan (B) dimasukkan ke dalam Persamaan (A) diperoleh

$$b = \frac{c_p - c_v}{\frac{R}{p + b}} - p \text{ atau } p + b = \frac{c_p - c_v}{R} (p + b) \text{ atau } c_p - c_v = R$$





$$(c) \quad p + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = \frac{c_p - c_v}{\beta v} = \frac{R}{p + b} = p + b = \frac{RT}{v} \quad (C)$$

$$c_v dT_q = - \left[ p + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T \right] dv_q \quad (D)$$

Bila Persamaan (C) dimasukkan ke dalam Persamaan (D) diperoleh

$$c_v dT_q = - \frac{RT}{v} dv_q \text{ atau } \frac{dT}{T} + \frac{dv}{v} = 0 \text{ dan bila diintegrasikan}$$

$$\ln T + \frac{R}{C_v} \ln v = \ln C$$

atau

$$Tv^{\frac{R}{C_v}} = C$$

Periksa  
Kembali



Contoh

6.2

(a) Buktikanlah bahwa entalpi jenis untuk gas pada contoh 1 adalah  $h = (a + R)T + \text{tetapan}$ .



(b) Carilah  $c_p$ . (c) Dengan menggunakan Persamaan (6.20), buktikanlah bahwa  $(p + b)^{\frac{-R}{c_p}} = \text{tetap}$ . (d) Buktikanlah bahwa  $\left(\frac{\delta h}{\delta v}\right)_p c_p \frac{T}{v}$ .

### Penyelesaian

*Diketahui:*

*Ditanya:* (a) Buktikanlah bahwa entalpi jenis untuk gas pada contoh 1 adalah

$$h = (a + R)T + \text{tetapan.}$$

(b) Carilah  $c_p$

(c) buktikanlah bahwa  $(p + b)^{\frac{-R}{c_p}} = \text{tetap}$

(d) Buktikanlah bahwa  $\left(\frac{\delta h}{\delta v}\right)_p c_p \frac{T}{v}$ .

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*  $dh = du + p dv + v dp$

$$h = (a + R)T + \text{tetapan}$$

$$c_p \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s = - \left[ \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T - v \right]$$

$$(a) \quad dh = du + p dv + v dp \quad (A)$$

Dari  $u = aT + bv + u_0$  dan  $(p + b)v = RT$

Maka Persamaan(A) menjadi

$$dh = a dT + b dv + p dv + v dp$$

atau

$$dh = a dT + (p + b)dv + v \left( \frac{R}{v} dT - \frac{RT}{v^2} dv \right)$$

atau

$$dh = (a + R)dT + \left( p + b - \frac{RT}{v} \right) dv$$



Dengan memperhatikan pada Persamaan keadaannya, maka faktor dalam kurung suku kedua pada ruas kanan sama dengan nol, sehingga

$$dh = (a + R)dT \quad (B)$$

Bila Persamaan (B) ini diintegrasikan, terbukti bahwa

$$h = (a + R)T + \text{tetapan} \quad (C)$$

$$(b) \quad c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = a + R$$

(c) Persamaan (6.20) adalah

$$c_p \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s = - \left[ \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T - v \right]$$

Dari Persamaan (C), maka  $\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = 0$ , sehingga

$$c_p \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s = v \quad (D)$$

Persamaan (D) dapat ditulis secara lain, yaitu

$$c_p dT_s = v dp_s \text{ atau } c_p dT_s = \frac{RT}{p+b} dp_s \quad (E)$$

dengan menghilangkan indeks  $s$  selanjutnya Persamaan (E) dapat ditulis menjadi

$$\frac{dT}{T} = \frac{R}{c_p} \frac{dp}{p+b}$$

Bila Persamaan yang terakhir ini diintegrasikan akan diperoleh

$$\ln T = \frac{R}{c_p} \ln(p+b) + \text{tetapan}$$

Selanjutnya dapat diubah menjadi

$$T(p+b)^{\frac{-R}{c_p}} = C \text{ (tetap)}$$

(d) Dengan mengingat persamaan keadaannya, maka Persamaan (C) dapat diubah menjadi

$$h = \frac{a+R}{R} (p+b)v + C$$



sehingga


$$\left(\frac{\partial h}{\partial v}\right)_p = \frac{a+R}{R}(p+b) = (a+R)\frac{T}{v}$$

Dari contoh 1,  $a = c_v$  dan  $c_v + R = c_p$  atau  $+R = c_p$ , sehingga

$$\left(\frac{\partial h}{\partial v}\right)_p = c_p \frac{T}{v}$$

Periksa  
Kembali





Buktikanlah bahwa

$$\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_v = c_v \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v \text{ dan } \left(\frac{\partial h}{\partial v}\right)_p = c_p \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p$$

### Penyelesaian

*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

$$\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v = c_v \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial v}\right)_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p = c_p \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p$$

Periksa  
Kembali



## 1. Soal Latihan



Latihan

1

Buktikanlah bahwa

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = -c_p \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h \text{ dan } \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p = c_p - p\beta v$$

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Untuk gas sempurna, buktikanlah bahwa:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T = 0 \text{ dan (b) } \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_u = 0$$

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Jika didefinisikan  $\mu = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h$ , buktikan bahwa:

(a)  $\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = -\mu c_P$

(b)  $\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_v = c_P \left(1 - \frac{\beta\mu}{\kappa}\right)$

(c)  $\left(\frac{\partial h}{\partial v}\right)_T = \frac{\mu c_P}{v\kappa}$

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali





Suatu gas sempurna ( $c_v = \frac{5}{2}R$ ) berubah dari keadaan a ke keadaan b melalui 3 jalan, yaitu a-c-b, a-d-b dan a-b. Jika  $p_2 = 2p_1$  dan  $v_2 = 2v_1$ , Hitunglah: (a). Kalor yang diperlukan tiap mol untuk ketiga proses tersebut. (b). Kalor jenis molar gas untuk proses a-b.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Carilah kapasitas kalor pada sebatang kawat yang mengalami tegangan  $\mathcal{F}$  bila (a) variabel eketensif tetap, dan (b) variabel intensif tetap.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Seperti contoh 8 untuk sistem yang berupa zat padat paramagnetik yang mengikuti Persamaan Curie

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Untuk gas Van der Waals, diketahui bahwa energi dalam jenisnya  $u = cT - a/v$  dengan  $c$  adalah tetapan. Carilah kalor jenis (a)  $c_v$  dan (b)  $c_p$

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali

## J. Tugas



Tugas

1

Pada langkah pemampatan dalam mesin diesel, udara dimampatkan dari keadaan yang tekanannya 1 atm dan suhu 300 K. Dalam pemampatan ini volumenya kira-kira menjadi  $\frac{1}{15}$  kali volume semula. Jika tetapan Laplace untuk udara  $\gamma = 1,4$ , hitunglah suhu akhir. Diandaikan bahwa pemampatan berlangsung secara adiabatik reversibel.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Seorang pakar dalam bidang teknik menyatakan bahwa ia telah berhasil menciptakan sebuah mesin siklik yang beroperasi antara dua reservoir dengan suhu 540 K dan 300 K. Keistimewaannya ialah bahwa mesin ini dapat menghasilkan usaha mekanis sebesar 450 J per 1000 J kalor yang diserap dari reservoir yang bersuhu tinggi. Apakah pernyataan itu benar?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Sebuah PLTN dengan Daya 750.000 kW dibangun dengan ketentuan sebagai berikut. Suhu reaktor 586 K dan suhu air sungai tempat pembuangan 293 K. (a) berapakah efisiensi termal maksimum yang dapat dicapai dan berapakah kalor minimum yang harus dibuang ke sungai ? (b) bila efisiensi termal yang dicapai hanya 60% dari nilai maksimum berapakah kalor yang harus dibuang ke sungai? Bila diketahui bahwa laju arus sungai 165 m<sup>3</sup>/s dan kalor jenis air sungai 4180 J/(kg K), berapakah kenaikan suhunya?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Sebuah mesin Carnot yang menggunakan udara kering sebanyak 58 gram sebagai zat pelaku usaha (*working substance*) menyerap kalor sebanyak 500 J tiap siklus pada  $127^{\circ}\text{C}$  dan melepaskan kalor ke reservoir suhu dingin pada suhu  $-1$ . Bobot molekul udara 29 dan tetapan Laplace  $\gamma = 1,4$ . Hitunglah (a) efisiensi termal, (b) kalor yang dilepaskan, (c) usaha oleh mesin, (d) perubahan energi dalam udara pada tiap langkah dalam siklus.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali





Zat pelaku usaha sebuah mesin Carnot yang beroperasi antara  $227^{\circ}\text{C}$  dan  $27^{\circ}\text{C}$  memperoleh kalor dari suatu reservoir dengan Laju 2 kW. (a) hitunglah efisiensi mesin, daya mekanis dan laju kalor yang dilepaskan ke dalam reservoir dingin. (b) cara manakah yang dapat meningkatkan efisiensi lebih benar: menaikkan suhu reservoir kalor dengan  $\Delta T$  sementara suhu reservoir dingin tetap, ataukah menurunkan suhu reservoirdingin dengan  $\Delta T$  sementara suhu reservoir kalor tetap?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



### A. Hukum Kedua Termodinamika

Hukum Pertama Termodinamika menyatakan bahwa energi adalah kekal, tak dapat diciptakan, tak dapat dimusnahkan. Energi hanya dapat diubah dari bentuk yang satu ke bentuk yang lain. Namun disini tidak dibahas mengenai proses dan arah yang mungkin dari perubahan energi tersebut. Sebagai contoh, dua buah benda yang berbeda temperaturnya bersentuhan. Maka kalor akan mengalir dari benda yang temperaturnya tinggi ke benda yang temperaturnya rendah. Peristiwa ini terjadi dengan sendirinya. Tetapi kita tidak pernah melihat dua buah benda yang temperaturnya sama bersentuhan, lalu kalor mengalir dari salah satu benda ke benda yang lain sehingga temperatur akhir kedua benda itu berbeda. Pada kasus ini energi kekal sesuai dengan Hukum Pertama Termodinamika. Namun kita tidak pernah melihat proses seperti ini di alam (terjadi dengan alami).

Gambar 7.1 dibawah ini memperlihatkan dua sistem yang berbeda dan masing-masing dilingkupi oleh dinding adiabatik. Pada Gambar (a) sebuah benda yang suhunya  $T_1$  bersinggungan dengan benda lain (reservoir) yang suhunya  $T_2$ . Jika suhu  $T_2$  lebih tinggi dari pada  $T_1$  maka sejumlah kalor akan mengalir dari reservoir masuk ke dalam benda pertama sampai akhirnya dicapai keadaan seimbang. Dalam keadaan seimbang ini, suhu benda pertama berubah menjadi  $T_2$  sama dengan suhu reservoir. Proses ini terjadi secara spontan. Seperti yang diketahui, reservoir adalah benda yang karena ukurannya besar atau karena sejumlah kalor mengalir keluar atau masuk ke dalamnya, suhunya tidak berubah.



**Gambar 7.1.** Dua sistem berbeda oleh dinding adiabatik

Pada Gambar (b) dilukiskan suatu bejana yang terbagi dua oleh diafragma. Bagian kiri berisi sejumlah gas dan bagian kanan hampa. Jika diafragma dirobek, maka sejumlah molekul gas dari bagian kiri akan bergerak memasuki bagian kanan sampai akhirnya dicapai keadaan seimbang dengan kedua bagian mempunyai tekanan yang sama. Proses inipun tak dapat berlangsung ke arah sebaliknya. Dari keadaan seimbang dengan molekul-molekul gas menempati kedua bagian dengan tekanan yang sama kemudian sejumlah molekul bergerak ke kiri sampai akhirnya bagian kanan menjadi hampa. Dari varian di atas dapat disimpulkan bahwa tampaknya hukum pertama tidak sensitif terhadap arah proses.

Hukum Pertama Termodinamika tidak dapat menjelaskan apakah suatu proses mungkin terjadi ataukah tak mungkin terjadi. Oleh karena itu, muncullah Hukum Kedua Termodinamika yang disusun tidak lepas dari usaha untuk mencari sifat atau besaran sistem yang merupakan fungsi keadaan. Ternyata orang yang menemukannya adalah Clausius dan besaran itu disebut entropi. Hukum kedua ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

*“Proses suatu sistem terisolasi yang disertai dengan penurunan entropi tidak mungkin terjadi. Dalam setiap proses yang terjadi pada sistem terisolasi, maka entropi sistem tersebut selalu naik atau tetap tidak berubah.”*

Hukum Kedua Termodinamika memberikan batasan dasar pada efisiensi sebuah mesin atau pembangkit daya. Hukum ini juga memberikan batasan energi masukan minimum yang dibutuhkan untuk menjalankan sebuah sistem pendingin. Maka hukum kedua secara langsung menjadi relevan pada banyak soal praktis yang penting.

Hukum Kedua Termodinamika juga dapat dinyatakan dalam konsep entropi yaitu sebuah ukuran kuantitatif derajat ketidakteraturan atau keacakan sebuah sistem pada tingkat mikroskopik. Proses-proses alami berlangsung dengan pembentukan entropidan bila entropi terbentuk, maka hilanglah kemampuan untuk melakukan usaha yang berguna. Hukum kedua dapat pula dirumuskan bahwa entropi dapat diciptakan tetapi tidak dapat dimusnahkan.

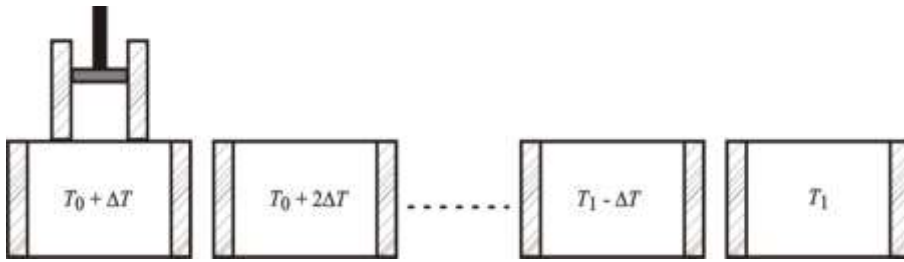
## B. Proses Reversibel dan Ireversibel

Proses yang tidak menyalahi hukum kedua, dapat dibagi menjadi dua macam, yaitu reversibel dan ireversibel (terbalikkan dan takterbalikkan). Proses yang dapat terjadi dalam suatu arah (misalnya benda yang berbeda temperaturnya bersentuhan, akhirnya seimbang termal), tetapi tidak dapat terjadi dalam arah sebaliknya. Proses demikian itu disebut proses *ireversibel* (artinya, tak terbalikkan). Lawannya, disebut proses *reversibel* (terbalikkan). Misalkan sebuah sistem mengalami suatu proses, berubah dari keadaan A ke keadaan B. Jika sesudah proses itu selesai, sistem dan lingkungannya dapat dikembalikan ke keadaan semula, sehingga pada hasil akhirnya tidak ada kalor yang berpindah dan tiada usaha yang dilakukan, maka proses tersebut disebut proses reversibel. Proses yang tidak memenuhi syarat ini disebut proses ireversibel.

Tinjau proses perpindahan kalor dari benda A (yang bertemperatur  $T_A$ ) ke benda B (yang bertemperatur  $T_B < T_A$ ), bila kedua benda itu bersentuhan. Setelah keduanya bertemperatur sama,  $T$ , dapatkah masing-masing dikembalikan ke keadaan semula? Dapat! Yang diperlukan adalah dua buah reservoir: Yang sebuah bertemperatur  $T_A$  dan yang lain  $T_B$ . Kemudian benda A dibiarkan bersentuhan dengan reservoir  $T_A$ . Benda B bersentuhan dengan reservoir  $T_B$ . Maka pada akhirnya benda A bertemperatur  $T_A$  dan B bertemperatur  $T_B$ , seperti sebelum proses. Tetapi terjadi pula perubahan lain di lingkungannya: reservoir  $T_A$  kehilangan kalor sebesar  $Q$ , sedang reservoir  $T_B$  menerima kalor sebesar  $Q$ . Dapatkah kalor  $Q$  dipindahkan dari reservoir  $T_B$  ke reservoir  $T_A$  tanpa perubahan lain? Jelas tidak dapat! Karena itulah proses tersebut dikatakan ireversibel.

Perhatikan contoh proses ireversibel, tampak bahwa pada proses itu adanya ketidakseimbangan atau gesekan (mungkin pula kedua-duanya). Karena itu, agar suatu proses reversibel, haruslah dalam proses itu tidak ada gesekan dan tidak ada pula ketidakseimbangan. Proses seideal itu tidak mungkin ada. Kalau proses itu quasistatik dan di dalamnya gesekan dapat diabaikan, cukuplah sudah proses itu dianggap reversibel. Selanjutnya anggapan inilah yang digunakan dalam pembahasan. Sebagai contoh, tinjaulah sistem yang bertemperatur  $T_0$ . Bagaimanakah temperatur itu diubah menjadi  $T_1$  secara reversibel? Jelaslah untuk ini tidak dapat menggunakan sebuah

reservoir yang bertemperatur  $T_1$  saja, dan membiarkan sistem bersentuhan dengan reservoir itu. Agar proses itu quasistatik haruslah digunakan sederet reservoir dengan temperatur  $T_0 + \Delta T, T_0 + 2\Delta T, \dots, T_1 - \Delta T, T_1$  (lihat gambar). Idealnya,  $\Delta T \longrightarrow 0$ ; ini berarti reservoir itu tak terhingga banyaknya. Dalam praktek keadaan ideal ini tentu saja tak dapat dicapai.



**Gambar 7.2.** Sederet reservoir bertemperatur  $T_0, T_0 + T_1$

Jika  $\Delta T$  kecil dibandingkan dengan  $T_0$  (dan  $T_1$ ), proses itu boleh dianggap quasistatik, dan reversibel.

## C. Entropi

### 1. Konsep Entropi

Pada pembicaraan tentang siklus Carnot, disebutkan bahwa  $Q_2$  adalah kalor yang masuk ke dalam sistem (diberi tanda positif) dan  $Q_1$  kalor yang keluar dari sistem (diberi tanda negatif). Karena itu untuk siklus Carnot

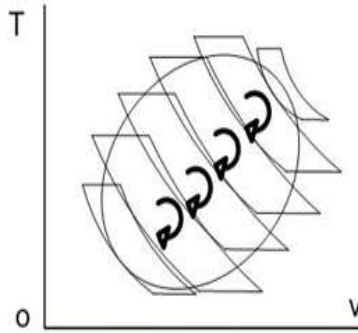
$$\frac{T_2}{T_1} = -\frac{Q_2}{Q_1}$$

atau

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Selanjutnya ditinjau suatu proses siklik reversibel sembarang seperti yang terlukis pada Gambar 7.3, berupa satu kurva tertutup. Proses semacam ini dapat didekati sedekat-dekatnya oleh sejumlah besar siklus Carnot kecil-kecil dengan arah yang sama. Bagian-bagian adiabatik siklus-siklus itu dilalui dua kali dengan arah yang berlawanan, sehingga saling meniadakan. Hasil keseluruhannya menjadi suatu garis bergerigi yang tertutup. Jika siklus-siklus itu dibuat tak terhingga kecil, maka bagian-

bagian adiabatik seluruhnya saling melenyapkan, sementara bagian-bagian isotermal tidak.



**Gambar 7.3.** Proses siklik reversible dapat didekati dengan sejumlah besar siklus Carnot

Jika suatu siklus kecil beroperasi antara suhu  $T_2$  dan  $T_1$  dengan aliran kalor yang berkaitan  $\Delta Q_2$  dan  $\Delta Q_1$ , maka untuk siklus itu berlaku persamaan

$$\frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} = 0$$

Jika dijumlahkan untuk semua siklus diperoleh

$$\sum \frac{\Delta Q_R}{T} = 0$$

Indeks R digunakan untuk menunjukkan bahwa prosesitu reversibel. Dalam keadaan limit, jika siklus-siklus itu dibuat tak terhingga kecil, maka proses yang berbentuk seperti gigi gergaji itu menjadi sangat dekat dengan proses siklik aslinya. Tanda sigma diatas boleh diganti dengan tanda integral tertutup. Jadi

$$\oint \frac{\delta Q_R}{T} = 0 \quad (7.1)$$

Besaran  $Q$  seperti sudah dijelaskan, bukanlah fungsi keadaan, sehingga  $\delta Q$  bukan diferensial  $\delta Q_R/T$  adalah diferensial eksak yang untuk selanjutnya akan diberi lambang  $dS$ . Besaran  $S$  inilah yang disebut entropi dan merupakan fungsi keadaan. Jadi

$$dS = \frac{\delta Q_R}{T} \quad (7.2)$$

Persamaan (7.1) dapat ditulis menjadi

$$\oint dS = 0 \quad (7.3)$$

Satuan  $S$  dalam sistem SI atau MKS adalah JK<sup>-1</sup>. Entropi adalah besaran ekstensif yang bila dibagi dengan jumlah massa  $m$  atau jumlah mol  $n$  menjadi entropi jenis  $s$ .

$$s = \frac{S}{m} \text{ atau } s = \frac{S}{n}$$

Satuan entropi jenis  $s$  menjadi J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> atau J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> dalam sistem SI dan J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> atau J kmol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> dalam sistem MKS.

## 2. Menghitung Perubahan Entropi dalam Proses Reversibel

Pada proses adiabatik,  $\delta Q = 0$ , dan dalam proses adiabatik reversibel  $\delta Q_R = 0$ . Oleh karena itu dalam setiap proses adiabatik reversibel,  $dS = 0$  atau ini berarti bahwa entropi  $S$  tetap. Proses demikian ini disebut pula sebagai proses isentropik. Jadi

$$\delta Q_R = 0 \text{ dan } dS = 0$$

Dalam proses isothermal reversibel, suhu  $T$  tetap, sehingga perubahan entropi

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q_R}{T} = \frac{1}{T} \int_1^2 \delta Q_R = \frac{Q_R}{T} \quad (7.4)$$

untuk melaksanakan proses semacam ini maka sistem dihubungkan dengan sebuah reservoir yang suhunya berbeda. Jika arus kalor mengalir masuk ke dalam sistem, maka  $Q_R$  positif dan entropi sistem naik. Jika arus kalor keluar dari sistem  $Q_R$  negatif dan entropi sistem turun.

Contoh proses isothermal reversibel ialah perubahan fase pada tekanan tetap. Arus kalor yang masuk ke dalam sistem per satuan massa atau per mol sama dengan kalor transformasi  $l$ , sehingga perubahan entropi jenisnya menjadi

$$s_2 - s_1 = \frac{l}{T} \quad (7.5)$$

Dalam kebanyakan proses suatu arus kalor yang masuk ke dalam sistem secara reversible umumnya disertai oleh perubahan suhu, sehingga perhitungan perubahan entropi dari Persamaan (7.4) suhu  $T$  tidak boleh dikeluarkan dari tanda integral. Jika proses terjadi pada volum tetap, maka  $\delta q = c_v dT$ , sehingga

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v \frac{dT}{T} \quad (7.6)$$

Jika proses terjadi pada tekanan tetap,  $\delta q = c_p dT$  dan

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} \quad (7.7)$$



Pada umumnya  $c_v$  dan  $c_p$  berubah dengan suhu sehingga tak boleh dikeluarkan dari tanda integral dalam Persamaan (7.6) dan (7.7). Untuk menghitung integral tersebut harus diketahui  $c_v$  dan  $c_p$  sebagai fungsi suhu. Jika  $c_v$  dan  $c_p$  dianggap tetap, maka hasil integral itu menjadi

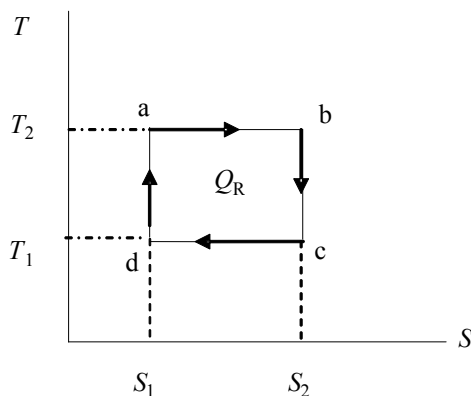
$$(s_2 - s_1)_v = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (7.8)$$

$$(s_2 - s_1)_p = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (7.9)$$

Jika suatu proses terdapat arus kalor antara sistem dengan lingkungan secara reversibel, maka pada hakekatnya suhu sistem dan suhu lingkungan adalah sama. Besar arus kalor yang masuk ke dalam sistem atau yang masuk ke dalam lingkungan disetiap titik adalah sama, tetapi harus diberi tanda yang berlawanan. Karena itu perubahan entropi lingkungan sama besar tetapi berlawanan tanda dengan perubahan entropi sistem dan jumlahnya menjadi nol. Karena sistem bersama dengan lingkungannya membentuk semesta, maka boleh dikatakan bahwa entropi semesta adalah tetap. Pernyataan ini berlaku hanya untuk proses reversibel saja.

### 3. Diagram $T$ - $S$

Entropi adalah fungsi keadaan, nilainya pada suatu keadaan seimbang dapat dinyatakan dalam variabel-variabel yang menentukan keadaan sistem. Dalam sistem  $p$ - $V$ - $T$  entropi dapat dinyatakan sebagai fungsi  $p$  dan  $V$ , atau  $T$  dan  $V$  atau  $p$  dan  $T$ . Seperti halnya energi dalam  $U$ , maka entropi  $S$  dapat pula dianggap sebagai salah satu variabel yang menentukan keadaan itu. Jika suhu  $T$  dipilih sebagai variabel yang lain, maka tiap keadaan sistem berkaitan dengan sebuah titik dalam diagram  $T$ - $S$ , dan tiap proses reversibel bersangkutan dengan sebuah kurva pada diagram ini.



**Gambar 7.4.** Siklus Carnot dalam diagram  $T$ - $S$

Siklus Carnot mempunyai bentuk yang lebih sederhana bila dilukiskan dalam diagram  $T$ - $S$ . Hal ini disebabkan karena siklus Carnot dibatasi oleh dua isoterm, berupa garis lurus yang tegak lurus pada sumbu  $T$  dan dua isentrop atau dua adiabat reversibel, berupa garis lurus yang tegak, lurus pada sumbu  $S$ . Pada Gambar 7.4 dilukiskan siklus Carnot a-b-c-d-a dalam diagram  $T$ - $S$ . Luas kawasan yang dikelilingi oleh kurva yang menyatakan siklus Carnot ini adalah kalor total yang masuk atau keluar sistem.

$$\oint TdS = \oint \delta Q_R = Q_R \quad (7.10)$$

#### 4. Perubahan Entropi dalam Proses Ireversibel

Perubahan entropi seperti yang dirumuskan pada Persamaan (7.2) berlaku untuk proses reversibel. Namun oleh karena entropi  $S$  adalah variabel keadaan, sehingga nilai perubahannya hanya ditentukan oleh keadaan awal dan akhir proses apapun, maka untuk proses ireversibel pun boleh digunakan rumus untuk proses reversibel asalkan keadaan awal dan akhir kedua proses itu sama.

Tinjau proses ireversibel seperti yang terlukis dalam Gambar 7.1 (a). Suhu benda pertama setelah berhubungan dengan benda kedua (reservoir) berubah dari  $T_1$  menjadi  $T_2$ . Walaupun proses ini adalah ireversibel, namun juga dapat digunakan rumus untuk proses reversibel asalkan keadaan awalnya sama dan keadaan akhirnya juga sama. Jika proses itu terjadi pada tekanan tetap dan  $C_p$  juga dapat dianggap tetap, maka

$$\Delta S_{benda} = S_2 - S_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (7.11)$$

Karena  $T_2 > T_1$  maka arus kalor masuk kedalam benda dan  $\ln \frac{T_2}{T_1}$  positif. Jadi entropi benda naik. Suhu reservoir tetap  $T_2$ , karena itu perubahan entropinya sama dengan perubahan entropi pada proses isotermal reversibel. Jadi

$$\Delta S_{res} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \frac{1}{T_2} C_p \int_{T_1}^{T_2} dT = C_p \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Karena arus kalor itu keluar dari reservoir, maka sesuai dengan perjanjian tentang tanda, harus diberi tanda negatif. Jadi

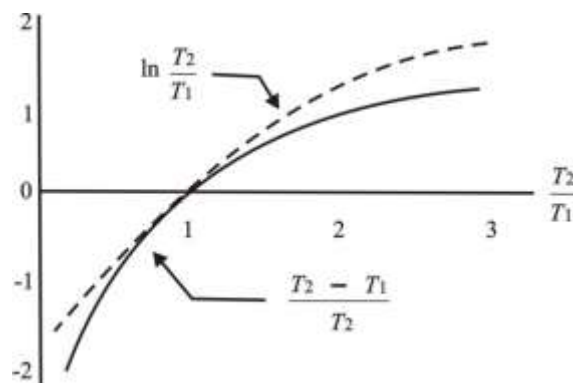
$$\Delta S_{res} = -C_p \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (7.12)$$

Karena  $T_2 > T_1$  maka  $\frac{(T_2 - T_1)}{T_2}$  positif, sehingga arus kanan demikian juga  $\Delta S_{res}$  menjadi negatif. Perubahan entropi total

$$\Delta S = \Delta S_{benda} + \Delta S_{res} = C_p \left( \ln \frac{T_2}{T_1} - \frac{T_2 - T_1}{T_2} \right) \quad (7.13)$$

Selanjutnya akan dibuktikan bahwa bentuk dalam kurung pada ruas kanan selalu positif, demikian pula  $\Delta S$  selalu positif. Sebab menurut hukum kedua termodinamika pada proses ireversibel entropi total yang bersangkutan akan bertambah. Untuk membuktikan hal ini dibuat grafik  $\ln \frac{T_2}{T_1}$  dan  $\frac{(T_2 - T_1)}{T_2}$  sebagai fungsi  $\frac{T_2}{T_1}$  lalu keduanya dijumlahkan. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 7.5.

Jika benda mula-mula pada suhu  $T_1$  yang lebih tinggi dari  $T_2$ , maka arus kalorkan mengalir dari benda kedalam reservoir. Dengan demikian perubahan entropi benda negatif sedang perubahan entropi reservoir menjadi positif. Perubahan entropi semesta dapat dilihat pada Gambar 7.5. Pada titik  $\frac{T_2}{T_1} = 1$  maka  $T_2 = T_1$ , disebelah kanannya adalah kawasan dengan  $T_2 > T_1$  dan disebelah kirinya adalah kawasan dengan  $T_2 < T_1$ . Ternyata selisih kedua grafik tersebut dikawasan manapun adalah positif, kecuali di titik yang bersangkutan dengan suhu  $T_2 = T_1$  yang nilainya sama dengan 0. Jika  $T_2 = T_1$ , maka prosesnya reversibel. Jadi untuk proses ireversibel, maka  $\Delta S$  semesta selalu positif.



**Gambar 7.5.** Grafik  $\ln \frac{T_2}{T_1}$  dan  $\frac{T_2 - T_1}{T_2}$  sebagai fungsi  $\frac{T_2}{T_1}$

Pada proses yang digambarkan pada Gambar 7.1.(b), tak ada arus kalor yang mengalir dalam sistem dan pula tak ada usaha disipatif. Namun oleh karena entropi itu adalah fungsi keadaan, maka perubahan entropi dalam proses ireversibel sama dengan perubahan entropi dalam proses reversibel, asal keadaan awal kedua proses sama dengan keadaan akhir kedua proses sama. Keadaan akhir proses ireversibel itu dapat dicapai dengan ekspansi reversibel. Dalam ekspansi semacam ini usaha luar harus dilakukan. Karena energi dalam sistem tetap, maka harus ada arus kalor yang mengalir ke dalam sistem yang sama besarnya dengan usaha luar tersebut. Entropi gas dalam proses reversibel ini naik dan kenaikan ini sama dengan kenaikan dalam proses sebenarnya yang ireversibel, yaitu ekspansi bebas.

## 5. Asas Kenaikan Entropi

Pada proses-proses ireversibel dalam pembahasan terdahulu, didapatkan bahwa entropi semesta (*universe*) selalu naik. Hal ini juga benar untuk semua proses ireversibel yang sudah dapat dianalisis. Kesimpulan ini dikenal sebagai asas kenaikan entropi dan dianggap sebagai bagian dari hukum kedua termodinamika. Asas ini dirumuskan sebagai berikut.

*Entropi semesta selalu naik pada tiap proses ireversibel.*

Jika semua sistem berinteraksi di dalam suatu proses dilingkupi dengan bidang adiabatik yang tegar, maka semua itu membentuk sistem yang terisolasi sempurna dan membentuk dunianya sendiri. Karena itu dapat dikatakan bahwa entropi dari suatu sistem yang terisolasi sempurna selalu naik dalam tiap proses ireversibel yang terjadi dalam sistem itu. Sementara itu entropi tetap tidak berubah dalam sistem yang terisolasi jika sistem itu menjalani proses reversibel. Karena itu secara lengkap Hukum Kedua Termodinamika dapat dirumuskan sebagai berikut.

*Pada setiap proses yang terjadi di dalam sistem yang terisolasi, entropi sistem tersebut selalu naik atau tetap tidak berubah.*

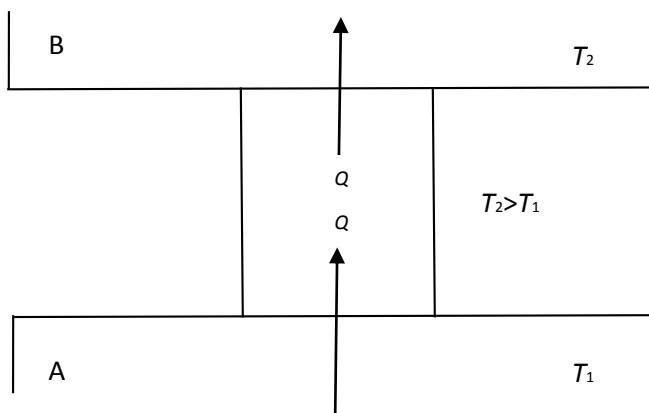
#### D. Pernyataan Clausius dan Kelvin-Planck Tentang Hukum Kedua Termodinamika

Telah dibahas bahwa hukum kedua sebagai pernyataan yang dikaitkan dengan kemungkinan perubahan entropi pada suatu proses. Dua pernyataan lain juga sering dipakai sebagai titik awal untuk merumuskan hukum kedua diungkapkan oleh Clausius dan Kelvin-Planck.

Pernyataan Clausius tentang hukum kedua adalah sebagai berikut,

*Suatu proses tidak mungkin terjadi, bila satu-satunya hasil adalah sejumlah arus kalor yang mengalir keluar dari suatu sistem dengan suhu tertentu dan semuanya masuk ke dalam sistem lain pada suhu yang lebih tinggi.*

Hal ini dijelaskan sebagai berikut.



Gambar 7.6.

Andaikan proses tersebut dapat berlangsung, seperti yang dilukiskan pada Gambar 7.6. Perubahan entropi sistem (reservoir) A dan B adalah

$$\Delta S_A = -\frac{|Q|}{T_1} \text{ dan } \Delta S_B = \frac{|Q|}{T_2}$$

Kedua sistem itu bersama-sama merupakan sebuah dunia semesta. Perubahan entropi semesta ini adalah

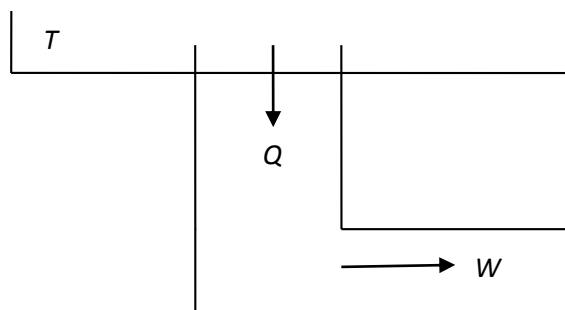
$$\Delta S = \Delta S_A + \Delta S_B = -\frac{|Q|}{T_1} + \frac{|Q|}{T_2} < 0$$

Perubahan entropi total ini negatif karena  $T_1 < T_2$ , Sehingga suku pertama yang negatif pada ruas kanan lebih besar dari pada suku kedua. Ini berarti bahwa dalam proses ini entropi menurun, sehingga menurut hukum kedua proses tersebut tidak mungkin terjadi.

Pernyataan Kelvin-Planck tentang hukum kedua adalah sebagai berikut.

*Suatu proses siklik tidak mungkin terjadi bila satu-satunya hasil adalah arus panas  $Q$  yang mengalir keluar dari suatu reservoir pada suhu tertentu dan seluruhnya diubah menjadi usaha mekanik.*

Proses semacam itu andaikata dapat berlangsung tidak bertentangan dengan hukum pertama, namun akan ternyata bertentangan dengan hukum kedua. Pada Gambar 7.7, dilukiskan proses tersebut. Andaikata dapat berlangsung. Reservoir mengalami perubahan entropi sebesar  $-\frac{|Q|}{T}$  dan tak ada kompensasi kenaikan entropi pada sistem lain.



Gambar 7.7.

Karena itu proses tersebut tidak mungkin terjadi. Pada mesin pemanas besar usaha itu tidak sama dengan seluruh arus kalor, di samping itu ada sejumlah kalor yang masuk ke dalam sistem (reservoir) kedua.

Pernyataan Clausius tentang hukum kedua menunjukkan bahwa efisiensi termal suatu mesin pemanas atau koefisien penampilan mesin pendingin mempunyai batas atas. Pada Gambar 7.8 di sebelah kiri (a) dilukiskan sebuah mesin kalor yang beroperasi antara dua reservoir dengan suhu  $T_1$  dan  $T_2$ , ( $T_2 > T_1$ ). Di sebelah kanan (b) dilukiskan sebuah refrigerator, juga beroperasi antara  $T_1$  dan  $T_2$ .

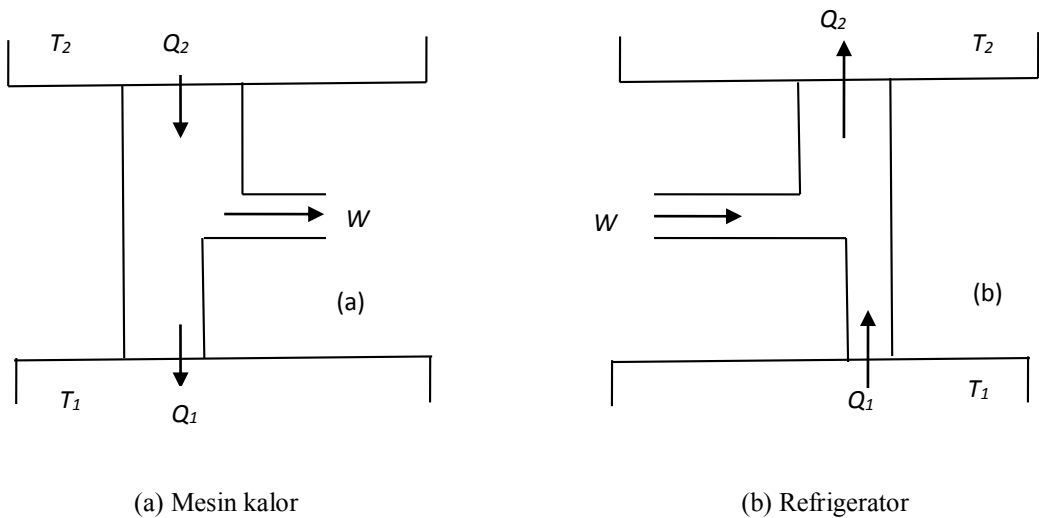
Kita tinjau dahulu Gambar (a), yaitu sebuah mesin kalor yang beroperasi antara sepasang reservoir dengan suhu  $T_1$  dan  $T_2$ . Menurut asas entropi, maka perubahan entropi semestanya adalah

$$\Sigma \Delta S = \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_2 - W}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} \geq 0$$

atau 
$$W \leq Q_2 \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)$$

atau 
$$W_{maks} = Q_2 \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)$$

atau 
$$\frac{W_{maks}}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (7.14)$$



**Gambar 7.8.**

Ruas kanan pada Persamaan 7.14 adalah efisiensi termal mesin Carnot. Karena itu dapat disimpulkan bahwa efisiensi maksimum suatu mesin yang beroperasi antara dua reservoir sama dengan efisiensi mesin Carnot yang beroperasi antara dua reservoir yang suhu-suhunya sama.

Gambar 7.8.b, melukiskan sebuah refrigerator yang beroperasi antara dua reservoir dengan suhu  $T_1$  dan  $T_2$ . Andaikan sejumlah massa air yang suhunya  $T_1$  didinginkan agar menjadi es. Setelah menempuh sejumlah siklus sejumlah kalor  $Q_1$  telah dipindahkan dari air, sejumlah usaha telah diberikan kepada refrigerator dan sejumlah kalor  $Q_2 = Q_1 + W$  telah dilepaskan ke dalam reservoir  $T_2$ .

Perubahan entropi untuk massa air  $\Delta S = S_2 - S_1$

untuk refrigerator  $\Delta S = 0$

untuk reservoir  $\Delta S = \frac{Q_1 + W}{T_2}$

jika diterapkan asas entropi

$$S_2 - S_1 + \frac{Q_1 + W}{T_2} \geq 0$$

atau  $W \geq (S_1 - S_2) - Q_1$

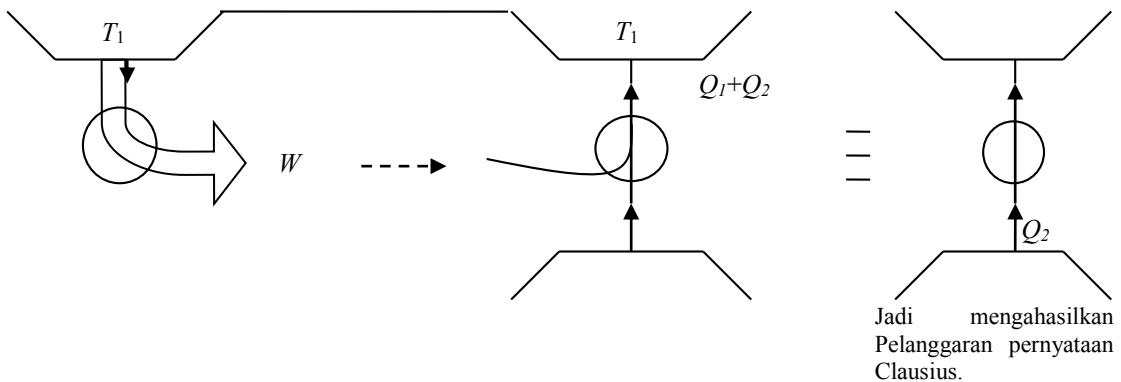
atau  $W_{min} = T_1(S_1 - S_2) - Q_1$

$W_{min}$  dapat digunakan untuk memperkirakan biaya minimum bagi refrigerator.

### E. Bukti Kesetaraan Pernyataan Kelvin-Planck dan Pernyataan Clausius

Langkah I:

Misal: Pernyataan Kelvin-Planck dapat dilanggar (tidak benar)



**Gambar 7.9.**

Dalam hal ini kita dapat membuat mesin yang menyerap kalor dari sebuah reservoir dan mengubah kalor itu menjadi usaha. Usaha dapat digunakan untuk menjalankan mesin pendingin biasa.

Sehingga reservoir  $T_1$  itu menerima kalor sebanyak

$$|Q_2| + |W| - |Q_1| = |Q_2| + |Q_1| - |Q_1| = |Q_2|$$

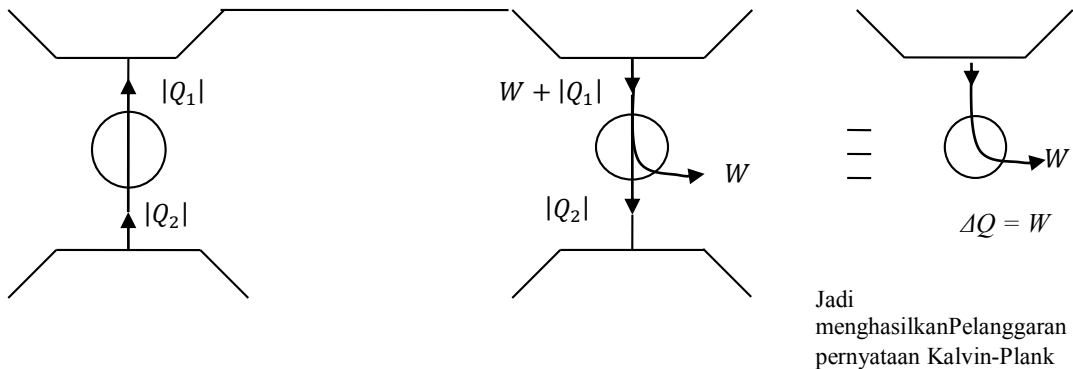
Sedangkan dari reservoir  $T_2$  diambil kalor sebanyak  $|Q_2|$  dari reservoir dingin ( $T_2$ ) ke reservoir ( $T_1$ ) tanpa perubahan lain apapun. Gabungan ini bertentangan dengan perumusan Clausius. Sehingga perumusan Clausius setara dengan perumusan Kelvin-Planck.



Langkah II:

Misal: pernyataan Clausius dapat dilanggar

Reservoir  $T_2$  menerima kalor  $|Q_2|$  dari motor-bakar, tetapi kalor pesawat ini pula diambil oleh pesawat pendingin. Jadi netto, reservoir  $T_2$  ini tidak mendapat maupun kehilangan kalor. Ini berarti reservoir  $T_2$  tidak diperlukan.



Gambar 7.10.

Reservoir  $T_1$  menerima kalor sebanyak  $|Q_2|$  dari pesawat pendingin, tetapi menerima kalor  $|Q_1| > |Q_2|$  kepada motor-bakar. Jadi netto, reservoir itu kehilangan kalor sebanyak  $|Q_1| - |Q_2|$ . Tetapi motor bakar itu pun melakukan usaha sebanyak  $|Q_1| - |Q_2|$ . Dapatlah disimpulkan bahwa reservoir  $T_1$  memberikan kalor  $|Q_1| - |Q_2|$  kepada gabungan itu, dan gabungan itu melakukan usaha sebanyak  $W = |Q_1| - |Q_2|$ . Jika demikian halnya, gabungan ini merupakan pesawat yang menentang perumusan Kelvin-Planck. Jadi: Kalau perumusan Clausius tidak benar, maka perumusan Kelvin-Planck pun tidak benar pula.

## F. Contoh Soal



Contoh

7.1

Carilah Perubahan entropi sistem selama proses berikut.

- Satu kg es pada  $0^{\circ}\text{C}$  dan tekanan 1 atm, mencair pada suhu dan tekanan yang sama. Kalor pencair es  $l_{pc} = 3,24 \times 10^5 \text{Jkg}^{-1}$ .
- Satu kg uap pada  $100^{\circ}\text{C}$  dan tekanan 1 atm mengembun menjadi air pada suhu dan tekanan yang sama. Kalor penguapan air  $l_{cu} = 2,26 \times 10^6 \text{Jkg}^{-1}$ .

### Penyelesaian

Diketahui:  $l_{pc} = 3,24 \times 10^5 \text{Jkg}^{-1}$  dan  $l_{cu} = 2,26 \times 10^6 \text{Jkg}^{-1}$

$T_1 = 0^{\circ}\text{C}$  dan  $T_2 = 100^{\circ}\text{C}$

Ditanya: (a) Perubahan entropi

(b) Perubahan entropi

Jawab

Rumus yang digunakan:  $\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta q}{T} = \frac{1}{T} \int_1^2 \delta q = \frac{q}{T} = \frac{ml_{pc}}{T}$

$$\Delta S = \frac{q}{T} = \frac{ml_{cu}}{T}$$

- a. Perubahan entropi

$$\begin{aligned}\Delta S &= \int_1^2 \frac{\delta q}{T} = \frac{1}{T} \int_1^2 \delta q = \frac{q}{T} = \frac{ml_{pc}}{T} \\ &= \frac{1\text{kg} \times 3,24 \times 10^5 \text{Jkg}^{-1}}{273 \text{K}}\end{aligned}$$

$$\Delta S = 12,2 \text{kJK}^{-1}$$



b. Seperti pada (a)

$$\Delta S = \frac{q}{T} = \frac{ml_{cu}}{T} = \frac{1 \text{ kg} \times 2,26 \times 10^6 \text{ J Kg}^{-1}}{373 \text{ K}}$$

$$\Delta S = 6,06 \text{ kJK}^{-1}$$

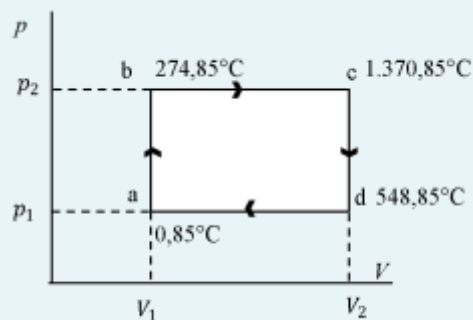
Periksa  
Kembali



Contoh

7.2

Suatu sistem menjalani proses siklis reversibel a-b-c-d-a (gambar berikut)



Gambar 7.11.



Jika  $C_v = 8 \text{ JK}^{-1}$  dan  $C_p = 10 \text{ JK}^{-1}$ ,

- Hitunglah kalor yang masuk ke dalam sistem pada tiap bagian siklus. Apakah arti dari jumlah semua arus kalor tersebut ?
- Jika  $V_1 = 9 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  dan  $V_2 = 20 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , hitunglah  $p_2 - p_1$
- Hitunglah  $\int \frac{\delta Q}{T}$  sepanjang tiap bagian siklus. Menurut hukum kedua apakah arti dari jumlah integral itu ?
- Andaikan suhu  $T'$  didefinisikan sebagai suhu Celcius di tambah dengan nilai yang lain dengan 273,15, apakah  $\oint \frac{\delta'Q}{T} = 0$ ? jelaskan!

### Penyelesaian

*Diketahui:*  $V_1 = 9 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  dan  $V_2 = 20 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

*Ditanya:* (a) Hitunglah kalor yang masuk ke dalam sistem pada tiap bagian siklus. Apakah arti dari jumlah semua arus kalor tersebut ?

(b) hitunglah  $p_2 - p_1$

(c) Hitunglah  $\int \frac{\delta Q}{T}$  sepanjang tiap bagian siklus. Menurut hukum kedua apakah arti dari jumlah integral itu ?

(d) Andaikan suhu  $T'$  didefinisikan sebagai suhu Celcius di tambah dengan nilai yang lain dengan 273,15, apakah  $\oint \frac{\delta'Q}{T} = 0$ ? jelaskan!

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*  $Q_{ab} = C_v \int_{T_a}^{T_b} dT = C_v(T_b - T_a)$

$$W = (p_2 - p_1)(V_2 - V_1)$$

$$\int_a^b \frac{\delta Q}{T} = C_v \int_{T_a}^{T_b} \frac{dT}{T}$$

Dari data di atas:

$$T_a = 274 \text{ K}, T_b = 548 \text{ K}, T_c = 1.644 \text{ K} \text{ dan } T_d = 822 \text{ K}$$



- a. Arus Kalor yang masuk ke dalam tiap bagian siklus adalah

$$Q_{ab} = C_v \int_{T_a}^{T_b} dT = C_v(T_b - T_a) = 8 \text{ JK}^{-1}(548 - 274)\text{K} = 2.192 \text{ J}$$

$$Q_{bc} = C_p \int_{T_b}^{T_c} dT = C_p(T_c - T_b) = 10 \text{ JK}^{-1}(1644 - 548)\text{K} = 10.960 \text{ J}$$

$$Q_{cd} = C_v \int_{T_c}^{T_d} dT = C_v(T_d - T_c) = 8 \text{ JK}^{-1}(822 - 1644)\text{K} = -6.576 \text{ J}$$

$$Q_{da} = C_p \int_{T_d}^{T_a} dT = C_p(T_a - T_d) = 10 \text{ JK}^{-1}(274 - 822)\text{K} = -5.480 \text{ J}$$

Menurut hukum pertama pada proses siklis,  $\Delta U = 0$ . Jadi kalau arus panas itu dijumlahkan maka nilainya sama dengan usaha  $W$ . Jadi,

$$W = \sum Q = (2.192 + 10.960 - 6.576 - 5.480)\text{J} = 1.096 \text{ J}$$

- b. Dari gambar, besar usaha  $W = (p_2 - p_1)(V_2 - V_1)$ , atau

$$p_2 - p_1 = \frac{W}{(V_2 - V_1)} = \frac{1.096 \text{ J}}{(20 - 9) \times 10^{-3} \text{ m}^3} = 99,64 \times 10^3 \text{ Pa}$$
$$= 99,64 \text{ kPa}$$

- c.  $\int_a^b \frac{\delta Q}{T} = C_v \int_{T_a}^{T_b} \frac{dT}{T} = C_v \ln \frac{T_b}{T_a} = 8 \ln \frac{548}{274} \text{ JK}^{-1} = \Delta S_{ab}$

$$\Delta S_{ab} = 5,545 \text{ JK}^{-1}$$

$$\int_b^c \frac{\delta Q}{T} = C_p \int_{T_b}^{T_c} \frac{dT}{T} = C_p \ln \frac{T_c}{T_b} = 10 \ln \frac{1.644}{548} \text{ JK}^{-1} = \Delta S_{bc}$$

$$\Delta S_{bc} = 10,986 \text{ JK}^{-1}$$

$$\int_c^d \frac{\delta Q}{T} = C_v \ln \frac{T_d}{T_c} = 8 \ln \frac{822}{1.644} \text{ JK}^{-1} = \Delta S_{cd}$$

$$\Delta S_{cd} = -5,545 \text{ JK}^{-1}$$

$$\int_d^a \frac{\delta Q}{T} = C_p \ln \frac{T_a}{T_d} = 10 \ln \frac{274}{822} \text{ JK}^{-1} = \Delta S_{da}$$

$$\Delta S_{da} = -10,986 \text{ JK}^{-1}$$



Jika nilai integral ini dijumlahkan  $= \Delta S_{\text{total}} = 0$  karena entropi adalah fungsi keadaan, dan proses ini adalah siklik.

- d. Andaikan  $T' = {}^{\circ}\text{C} + X$ , dengan  $X \neq 273,15$ , tetapi misalkan 0, maka kalau dihitung ternyata

$$e. \oint \frac{\delta Q}{T} \neq 0$$

- f. Hal ini sesuai dengan matematika yang menyatakan bahwa suatu diferensial bukan eksak dapat dibuat eksak apabila dikalikan dengan suatu fungsi dari variabel bebas yang disebut *integrating factor*. Dalam hal ini  $1/T'$  menjadi *integrating factor* hanya apabila  $X = 273,15$

Periksa Kembali



Sebuah mesin Carnot beroperasi dengan 1 kg gas metan, yang dianggap sebagai gas sempurna. Tetapan Laplacey = 1,35. Jika volume maksimum adalah 4 kali volume minimum dan efisiensi termalnya 25% carilah perubahan entropi gas ini pada ekspansi isothermal dan pada seluruh siklus.

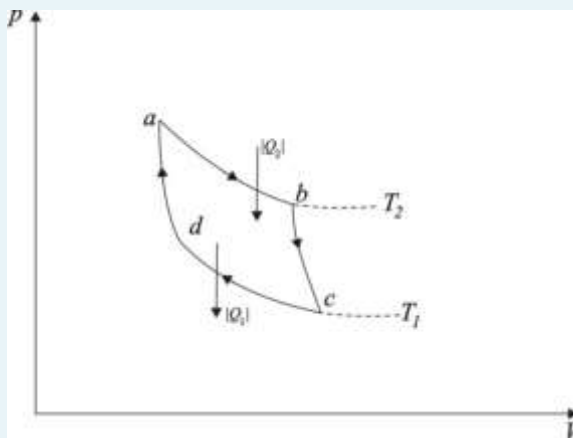
### Penyelesaian

*Diketahui:* Tetapan Laplace  $\gamma = 1,35$ ; efisiensi termalnya 25%

*Ditanya:* Carilah perubahan entropi gas ini pada ekspansi isothermal dan pada seluruh siklus

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*  $Q = W$



Gambar 7.12.

Sesuai dengan Gambar 7.12, maka yang ditanyakan sebenarnya adalah perubahan entropi pada proses dari a ke b. Pada proses isothermal, energi dalam  $U$  adalah tetap, sehingga  $\Delta U = 0$ . Karena itu sesuai dengan hukum pertama  $Q = W = -$

Periksa  
Kembali



## G. Soal Latihan



Latihan

1

Sepuluh kg air, suhu  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dicampur dengan 2 kg es yang suhunya  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  pada tekanan 1 atm, hingga dicapai keadaan setimbang. Hitunglah suhu akhir dan perubahan entropinya jika diketahui  $c_p$  air =  $4,18 \times 10^3\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$ ,  $c_p$  es =  $2,09 \times 10^3\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$  dan Kalorlebur es  $l_{pc} = 3,34 \times 10^5\text{ J kg}^{-1}$ .

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi





Periksa  
Kembali



Latihan

2

Jika  $S_V$  adalah entropi sistem yang bersangkutan dengan keadaan bahwa semua molekul menempati seluruh volume bejana  $V$  dan  $S_{V/2}$  adalah entropi sistem yang bersangkutan dengan keadaan semua molekul hanya menempati separuh volume saja, berapakah besar selisih entropi  $S_V - S_{V/2}$ .

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

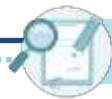
*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



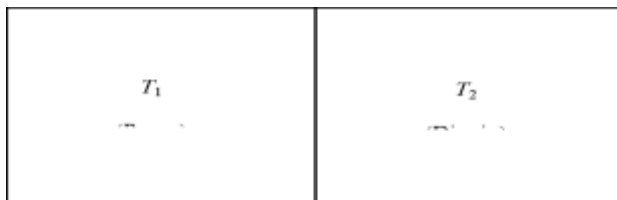
Periksa  
Kembali



Latihan

3

Perhatikan gambar di bawah ini.



Sebuah bejana dipisah menjadi dua ruangan yang volumenya sama. Kedua ruangan mengandung gas yang sama dengan massa yang setara, masing-masing 0,740 gram dan  $c_v$  untuk gas adalah 745 J/kgK. Pada awalnya, gas panas berada pada temperatur 67,0°C, sementara gas dingin adalah pada temperatur 20,0°C. Tidak ada panas yang dapat meninggalkan atau memasuki kedua ruangan kecuali perlahan-lahan melalui penyekat. Tentukan perubahan entropi dari setiap ruangan saat gas panas mendingin dari 67,0°C menjadi 65,0°C.

## Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

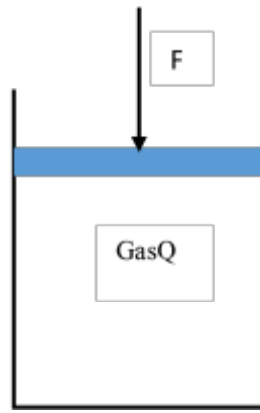
Jadi



Periksa  
Kembali



Gas ideal dalam silinder pada gambar pada awalnya berada pada kondisi  $P_1$ ,  $V_1$ ,  $T_1$ . Gas tersebut perlahan-lahan memuai pada temperatur konstan dengan membiarkan piston naik. Kondisi akhirnya adalah  $P_2$ ,  $V_2$ ,  $T_1$ , dimana  $V_2 = 3V_1$ . Tentukan perubahan entropi gas selama memuai. Massa gas adalah 1,5 g dan  $M = 28$  kg/kmol.



### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Latihan

5

Air sebanyak 0,1 kg pada suhu  $100^{\circ}\text{C}$  berubah seluruhnya menjadi uap air  $100^{\circ}\text{C}$ . Jika kalor laten uap air adalah  $2,2 \times 10^6$  J/kg. Tentukan kenaikan entropi sistem!

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Latihan

6

Sebuah gas ideal terkurung dalam sebuah silinder oleh sebuah piston. Piston tersebut didorong ke bawah perlahan-lahan sehingga temperatur gas tetap pada  $20,0^{\circ}\text{C}$ . Selama penekanan, dilakukan usaha  $730\text{ J}$  terhadap gas.

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Latihan

7

Andaikan suatu skala suhu didefinisikan dari sifat-sifat termometrik zat A, demikian rupa sehingga efisiensi termal sebuah mesin Carnot yang beroperasi antar titik didih dan titik lebur zat ini pada tekanan 1 atm, adalah tepat 50 %. Satu derajat pada skala baru ini sama dengan 2 skala Fahrenheit, dan terdapat 75 skala derajat zat A antara titik didih dan titik lebur. Tentukanlah suhu titik didih dan titik lebur zat itu menurut skala Kelvin.

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*



*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



## H. Tugas



Tugas

1

Diketahui 100 gram air bersuhu  $27^{\circ}\text{C}$  dihubungkan dengan suatu reservoir bersuhu  $77^{\circ}\text{C}$ . Jika suhu air mencapai  $77^{\circ}\text{C}$ , maka tentukanlah (kalor jenis air  $4200 \text{ J/kgC}^{\circ}$ )

- perubahan entropi air,
- tentukan pula perubahan entropi reservoir, dan
- entropi keseluruhan sistem.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Seorang pakar dalam bidang ilmu teknik menyatakan bahwa ia telah berhasil menciptakan sebuah mesin siklik yang beroperasi antara dua reservoir dengan suhu 540 K dan 300 K. Keistimewaannya ialah bahwa mesin ini dapat menghasilkan kerja mekanis sebesar 450 J tiap 1000 J kalor yang diserap dari reservoir suhu tinggi. Apakah pernyataannya ini benar? (selesaikan dengan menggunakan asas kenaikan entropi).

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Sebuah silinder horizontal tertutup kedua ujungnya dan terbagi dua sama besar oleh sebuah kelep yang bebas tak mempunyai berat dan licin. Bagian kiri silinder berisi 1 kmol gas sempurna pada 200 kPa dan 288 K. Kalor jenis gas tetap, yaitu  $c_v = 20,88 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$  dan  $c_p = 29,20 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Mula-mula bagian kanan hampa dan kelep ditahan untuk sementara. Kemudian terjadilah proses sebagai berikut (1) Penahan kelep disingkirkan sehingga gas menjalani ekspansi dengan mendorong kelep sampai ke ujung kanan. (2) Dengan batang kecil kelep didorong kembali ketengah. Semua proses diandaikan adiabatik. (a) Berapakah suhu gas pada akhir proses (1) setelah dicapai keadaan seimbang? (b) Berapakah suhu gas pada akhir proses (2), jika proses tersebut adalah reversible adiabatik? (c) Berapakah tekanan pada akhir proses (2)? (d) Berapakah kerja pada proses (2)? (e) Berapakah perubahan entropi untuk proses (1) dan gabungan proses (1) dan (2)?

#### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Tugas

4

Buktikanlah bahwa arus kalor yang mengalir antara dua reservoir pada suhu  $T_1$  dan  $T_2$  dengan ketentuan bahwa  $T_2 > T_1$ , selalu dari reservoir yang lebih panas.

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Tugas

5

Satu kmol gas sempurna dimampatkan secara isothermal pada suhu 400 K dari 100 kPa menjadi 1000 kPa di dalam sistem berupa selinderberpiston. Hitunglah perubahan entropi gas, perubahan entropi lingkungan, dan perubahan entropi semesta sebagai akibat dari proses ini bila (a) proses secara mekanis reversibel dan lingkungan terdiri atas reservoir pada 400 K, (b) proses secara mekanis reversibel dan lingkungan terdiri atas reservoir dengan 300 K, (c) proses secara mekanis ireversibel, yang memerlukan 20 % lebih banyak kerja dari pada pemampatan secara mekanis reversibel dan lingkungan berupa reservoir pada suhu 300 K.

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*



*Jawab*  
*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali

### A. Hukum I Termodinamika

Energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Kita hanya dapat mengubah bentuk energi, dari bentuk energi yang satu ke bentuk energi yang lain. Apabila suatu sistem diberi kalor, maka kalor tersebut akan digunakan untuk melakukan usaha luar dan mengubah energi dalam.

*Hukum I Termodinamika* menyatakan bahwa:

*“Untuk setiap proses, apabila kalor  $Q$  diberikan kepada sistem dan sistem melakukan usaha  $W$ , maka akan terjadi perubahan energi dalam”*

$$\Delta U = Q - W$$

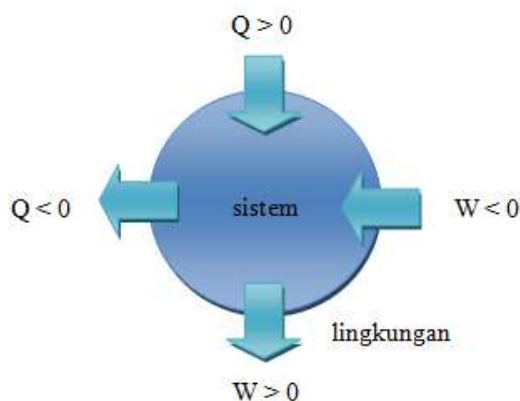
Hukum I Termodinamika juga dapat dituliskan dalam bentuk diferensial:

$$\delta Q = dU + \delta W$$

Dimana,  $\delta Q$  = Jumlah kalor

$\delta W$  = Usaha/ kerja

$dU$  = Perubahan energi dalam



**Gambar 8.1.**

- $W$  bertanda positif jika sistem melakukan usaha terhadap lingkungan
- $W$  bertanda negatif jika sistem menerima usaha dari lingkungan

- $Q$  bertanda positif jika sistem menerima kalor dari lingkungan
- $Q$  bertanda negatif jika sistem melepas kalor pada lingkungan

## B. Hukum II Termodinamika

1. Hukum II termodinamika dalam pernyataan aliran kalor

*“Kalor mengalir secara spontan dari suatu benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah secara spontan dan tidak mengalir secara spontan dalam arah kebalikannya”*

2. Hukum II Termodinamika dalam pernyataan tentang mesin kalor

*“Tidak mungkin membuat suatu mesin kalor yang bekerja dalam satu siklus yang semata-mata menyerap kalor dari sebuah reservoir dan mengubah seluruhnya menjadi usaha luar”*

3. Hukum II Termodinamika dalam pernyataan entropi

*“Total entropi semesta tidak berubah ketika proses reversible terjadi dan bertambah ketika proses ireversibel terjadi.”*

## C. Perpaduan Hukum I Dan II Termodinamika

Bila hukum pertama dan kedua digabungkan atau digunakan bersama, ternyata dapat diperoleh beberapa hubungan termodinamika yang penting. Perumusan hukum pertama termodinamika secara analitik dalam bentuk diferensial untuk sembarang proses adalah

$$\delta Q = dU + \delta W \quad (8.1)$$

Hukum kedua menyatakan bahwa untuk suatu proses reversibel antara dua keadaan seimbang

$$\delta Q_R = TdS \quad (8.2)$$

Kerja dalam proses reversibel untuk sistem  $p - V - T$  adalah

$$\delta W = pdV \quad (8.3)$$

Oleh karena itu pada proses reversibel untuk sistem  $p - V - T$

$$TdS = dU + pdV \quad (8.4)$$

Definisi entalpi ialah

$$H = U + pV$$



dan dalam bentuk diferensial

$$dH = dU + pdV + Vdp = TdS + Vdp$$

Yang dapat dirumuskan dalam bentuk lain menjadi

$$TdS = dH - Vdp \quad (8.5)$$

Dalam bentuk nilai jenisnya, maka kedua persamaan diatas menjadi

$$Tds = du + pdv \quad (8.6)$$

$$Tds = dh - vdp \quad (8.7)$$

Pada volume tetap pada proses isokhorik, Persamaan (8.6) menjadi  $Tds_v = du_v$ , sehingga kalor jenis pada volume tetap adalah:

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v = T \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v \quad (8.8)$$

Pada tekanan tetap (proses isobarik), Persamaan (8.7) menjadi  $Tds_p = dh_p$ , sehingga kalor jenis pada tekanan tetap :

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = T \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p \quad (8.9)$$

Sebagai besaran keadaan, maka besaran-besaran seperti  $u$  ataupun  $h$  dalam sistem  $p$ - $v$ - $T$  dapat dinyatakan sebagai fungsi  $T$  dan  $v$ , atau  $T$  dan  $p$  ataupun  $p$  dan  $v$ .

### 1. Variabel Bebas $T$ dan $v$

Persamaan-persamaan dibawah ini menyangkut nilai jenis berbagai besaran, sehingga hasilnya tak tergantung pada massa atau jumlah mol sistem, tetapi hanya menyangkut zat yang menyusun sistem tersebut. Dari Persamaan (8.6) dapat diperoleh

$$ds = \frac{1}{T}(du + pdv)$$

Jika  $u = u(T, v)$ , maka

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv$$

Karena itu maka

$$ds = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \frac{1}{T} \left[ \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + p \right] dv \quad (8.10)$$

Sementara itu  $ds$  adalah diferensial eksak, sehingga pada persamaan diatas dapat diterapkan pendiferensialan parsial secara silang. Hasilnya ialah

$$\frac{1}{T} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial v \partial T} \right) = \frac{1}{T} \left[ \left( \frac{\partial^2 u}{\partial T \partial v} \right) + \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \right] - \frac{1}{T^2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right]$$

Persamaan ini dapat disederhanakan menjadi

$$\left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p = T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = \frac{T\beta}{\kappa} \quad (8.11)$$

Bila Persamaan (8.11) ini dimasukkan ke dalam Persamaan (8.10) dan kedua ruas dikalikan dengan  $T$ , diperoleh

$$T ds = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv$$

yang juga dapat dirumuskan dalam bentuk lain menjadi

$$T ds = c_v dT + T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv \quad (8.12)$$

Persamaan (8.12) ini disebut persamaan  $Tds$  dengan variabel bebas  $T$  dan  $v$  yang banyak digunakan dalam perhitungan.

## 2. Variabel Bebas $T$ dan $p$

Persamaan (8.7) dapat diubah menjadi

$$ds = \frac{1}{T} (dh - v dp)$$

$h$  sebagai fungsi  $T$  dan  $p$ , maka

$$dh = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T dp$$

sehingga

$$ds = \frac{1}{T} \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \frac{1}{T} \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T - v \right] dp \quad (8.13)$$

Karena  $ds$  adalah diferensial eksak, maka pada kedua suku diruas kanan dapat dilakukan diferensial parsial silang dan selanjutnya disamakan. Karena ada yang saling menyalipkan maka hasilnya adalah

$$\left( \frac{\partial h}{\partial p} \right)_T - v = -T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = -Tv\beta \quad (8.14)$$

Jika Persamaan (8.14) ini dimasukkan ke dalam Persamaan (8.13) akan diperoleh hasil

$$ds = \frac{1}{T} \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT - v\beta dp$$

yang dapat dirumuskan dalam bentuk lain menjadi

$$Tds = c_p dT - T \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_p dp \quad (8.15)$$

Inilah Persamaan  $T ds$  yang kedua dalam variabel bebas  $T$  dan  $p$ .

### 3. Variabel Bebas $v$ dan $p$

$T$  sebagai fungsi  $v$  dan  $p$ , maka

$$dT = \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_p dv + \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_v dp$$

Jika persamaan terakhir ini dimasukkan ke dalam Persamaan (8.15) dan disusun kembali akan diperoleh

$$Tds = c_p \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_p dv + \left[ c_p \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_v - T v \beta \right] dp$$

atau

$$Tds = c_p \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_p dv + \left[ c_p \frac{\kappa}{\beta} - T v \beta \right] dp$$

atau

$$Tds = c_p \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_p dv + \left[ \frac{c_p \kappa - T v \beta^2}{\beta} \right] dp \quad (8.16)$$

dalam sub bab (VI.A.2. Variabel bebas  $T$  dan  $v$ ) telah didapatkan bahwa

$$c_p - c_v = \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (8.17)$$

Bila Persamaan (8.11) dimasukkan ke dalam Persamaan (8.17) ini, maka akan diperoleh hasil

$$c_p - c_v = T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{T v \beta^2}{\kappa} \quad (8.18)$$

hasil ini dimasukkan ke dalam Persamaan (8.16)

$$Tds = c_p \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_p dv + \left( \frac{c_p \kappa - \kappa (c_p - c_v)}{\beta} \right) dp$$

atau

$$Tds = c_p \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_p dv + \frac{\kappa c_v}{\beta} dp$$

yang juga dapat dirumuskan dalam bentuk

$$Tds = c_p \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_p dv + c_v \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_v dp \quad (8.19)$$

Persamaan (8.19) ini merupakan persamaan  $Tds$  yang ketiga dalam variabel bebas  $p$  dan  $v$ .

#### 4. Persamaan-persamaan $Tds$

Ketiga macam persamaan  $Tds$  seperti yang telah dijabarkan di muka, adalah rumus-rumus yang penting di dalam termodinamika. Rangkuman ketiga persamaan tersebut dicantumkan lagi di bawah ini.

$$Tds = c_v dT + T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv \quad (8.20)$$

$$Tds = c_p dT - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp \quad (8.21)$$

$$Tds = c_p \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_v dv + c_v \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_p dp \quad (8.22)$$

Ketiga persamaan itu juga dapat dirumuskan secara lain bila kita ingat akan rumus-rumus yang sudah dibicarakan pada bab-bab terdahulu. Adapun yang dimaksud adalah

$$Tds = c_v dT + T \frac{\beta}{\kappa} dv \quad (8.23)$$

$$Tds = c_p dT - T v \beta dp \quad (8.24)$$

$$Tds = \frac{c_p}{v\beta} dv + c_v \frac{\kappa}{\beta} dp \quad (8.25)$$

Persamaan  $Tds$  ini memungkinkan kita misalnya untuk menghitung aliran kalor, kenaikan suhu zat cair atau zat padat bila dimampatkan secara adiabatik, dan lain-lain.

#### 5. Beberapa Penerapan Rumus $Tds$

Dari rumus  $Tds$  yang pertama, Persamaan (8.20) bila dibagi dengan  $T$  akan diperoleh

$$ds = \frac{1}{T} c_v dT + \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv$$

karena  $ds$  adalah diferensial eksak maka

$$\frac{1}{T} \left( \frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T = \left( \frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_v$$

atau

$$\left( \frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T = T \left( \frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_v \quad (8.26)$$

Suatu zat yang tekanannya merupakan fungsi linear dari  $T$ , maka kalor jenisnya pada volume tetap  $c_v$  tak tergantung pada volume jadi bukan fungsi  $v$ , walaupun mungkin masih merupakan fungsi suhu. Hal ini disebabkan karena ruas kanan pada Persamaan (8.26) menjadi nol. Oleh karena itu maka ruas kiripun, yaitu  $\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T$ , juga harus sama dengan nol. Ini berarti bahwa  $c_v$  bukanlah merupakan fungsi  $v$ .  $\partial c_v$  adalah perubahan  $c_v$  bila  $v$  berubah dengan  $\partial v$  pada  $T$  yang tetap. Karena hasil baginya sama dengan nol berarti bahwa walaupun  $\partial v$  tidak sama dengan nol tetapi  $\partial c_v = 0$ , atau  $c_v$  tidak mengalami perubahan walaupun  $v$  berubah. Contoh zat yang tekanannya merupakan fungsi linear dari suhu ialah gas ideal dan juga gas Van der Waals. Oleh karena itu  $c_v$  kedua macam gas ini tidak tergantung pada  $v$ .

Dari rumus  $T ds$  yang kedua bila dibagi dengan  $T$  diperoleh

$$ds = \frac{1}{T} c_p dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dp$$

karena  $ds$  adalah diferensial eksak, maka

$$\frac{1}{T} \left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T = - \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p$$

atau

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T = -T \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p \quad (8.27)$$

untuk zat yang volumenya merupakan fungsi linear dengan  $T$ , seperti halnya gas ideal, maka ruas kanan sama dengan nol, sehingga ruas kiripun harus sama dengan nol pula. Ini berarti bahwa kalor jenis zat itu pada tekanan tetap tidak merupakan fungsi tekanan.

Rumus  $T ds$  yang ketiga bila dibagi dengan  $T$ , menjadi

$$ds = \frac{1}{T} c_p \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p dv + \frac{1}{T} c_v \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v dp$$

Ini berarti bahwa

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_p = \frac{1}{T} c_p \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_p = \frac{c_p}{T v \beta} \quad (8.28)$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_v = \frac{1}{T} c_v \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v = \frac{c_v \kappa}{T \beta} \quad (8.29)$$

Dari Persamaan (8.18) dapat disimpulkan bahwa  $c_p - c_v$  suatu zat dapat dihitung dari persamaan keadaanya atau dari  $\beta$  dan  $\kappa$ . Nilai  $T$ ,  $v$  dan  $\kappa$  selalu positif, tetapi  $\beta$  dapat

positif atau negatif dan dapat pula sama dengan nol. Untuk air  $\beta = 0$  pada  $4^\circ\text{C}$  dan negatif antara  $0^\circ\text{C}$  dan  $4^\circ\text{C}$ , tetapi di dalam persamaan di atas  $\beta$  terdapat dalam bentuk kuadrat, sehingga nilainya menjadi selalu positif, atau dengan perkataan lain  $c_p > c_v$ .

Jika  $h$  adalah fungsi  $T$  dan  $p$ , maka

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp$$

atau

$$dh = c_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp$$

Bila Persamaan (8.14) dimasukkan ke dalam persamaan yang terakhir ini. akan diperoleh

$$dh = c_p dT + \left[ v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \right] dp \quad (8.30)$$

Telah didapatkan bahwa

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p = \frac{c_p}{T} \quad (8.31)$$

Bila Persamaan (8.31) ini didiferensialkan terhadap  $p$  pada  $T$  tetap,

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T = T \left(\frac{\partial^2 s}{\partial p \partial T}\right) \quad (8.32)$$

Dari persamaan  $T ds = dh - v dp$  dapat diubah menjadi

$$ds = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p dT + \frac{1}{T} \left[ \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T - v \right] dp$$

Ini berarti bahwa

$$\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T = \frac{1}{T} \left[ \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T - v \right] \quad (8.33)$$

Sementara itu Persamaan (8.14)

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = -T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p + v \quad (8.34)$$

Dari kedua persamaan terakhir ini diperoleh

$$\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T = - \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = -\beta v \quad (8.35)$$

## 6. Penerapan Lain Rumus $T ds$

a. Persamaan  $T ds$  juga memungkinkan untuk menghitung arus kalor  $\delta q = T ds$  dalam proses reversibel. Jika prosesnya terhingga (finite), maka dalam hal ini perlu pengintegralan.

Jika rumus  $T ds$  dibagi dengan  $T$  diperoleh  $ds$  sebagai fungsi dua dari tiga variabel  $p$ ,  $v$  dan  $T$ . Jika proses itu adiabatik reversibel, maka  $\delta q = T ds = 0$ . Jadi  $s$  tetap, sehingga proses itu juga disebut proses isentropik.

b. Kenaikan suhu zat cair atau padat jika dimampatkan secara adiabatik dapat pula dicari dari persamaan  $T ds$  sebagai berikut

$$T ds = 0 = c_v dT_s + \frac{\beta T}{\kappa} dv_s$$

atau

$$dT_c = -\frac{\beta T}{\kappa c_v} dv_s \quad (8.36)$$

$dv_s < 0$ , karena dimampatkan, tetapi dapat positif ataupun negatif. Oleh karena itu

$$dT_s > 0 \text{ bila } \beta > 0$$

$$dT_s < 0 \text{ bila } \beta < 0$$

Air antara  $0^\circ\text{C}$  dan  $4^\circ\text{C}$  mempunyai  $\beta$  negatif jadi  $dT_s < 0$

c. Jika tekanan dinaikkan dalam proses isentropik, maka

$$T ds = 0 = c_v dT_s - \beta v T dp_s$$

$$dT_s = \frac{\beta v T}{c_p} dp_s \quad (8.37)$$

Jadi jika  $\beta > 0$ , maka suhu naik, karena  $dp_s > 0$ . Apabila dikehendaki supaya suhunya tetap ketika tekanan dinaikkan, maka harus ada arus kalor yang mengalir keluar dari sistem itu. Besar arus kalor ini dapat dicari dari persamaan  $T ds$  yang kedua.

$$\delta q = T ds = c_p dT - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp$$

Kalau  $T$  tetap, maka  $dT = 0$  sehingga

$$\delta q_T = -\beta v T dp_T \quad (8.38)$$

d. Tekanan yang diperlukan untuk menurunkan volume secara adiabatik reversibel dapat dicari dari rumus bentuk ketiga sebagai berikut

$$Tds = 0 = \frac{\kappa c_v}{\beta} dp_s + \frac{c_p}{\beta v} dv_s$$

atau

$$dp_s = - \frac{c_p}{v\kappa c_v} dv_s \quad (8.39)$$

Persamaan terakhir ini dapat pula diubah menjadi

$$- \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_s = \kappa \frac{c_v}{c_p} = \frac{\kappa}{\gamma} \quad (8.40)$$

Ruas kiri pada Persamaan (8.40) ini disebut ketertampatan isentropik atau adiabatik reversibel dan diberi lambing  $\kappa_s$ . Kalau dibandingkan dengan ketertampatan isothermal, yaitu

$$\kappa = - \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$$

maka

$$\kappa_s = \frac{\kappa}{\gamma} \quad (8.41)$$

Untuk zat padat ataupun zat cair  $\gamma$  selalu lebih besar dari 1 atau sama dengan 1. Oleh karena itu maka  $\kappa_s$  selalu lebih kecil atau sama dengan  $\kappa$ . Hal ini benar demikian dapat pula diterangkan secara kualitatif.

Jika tekanan diperbesar pada proses pemampatan isentropik, maka volumenya menjadi lebih kecil oleh pengurangan sebesar  $(\partial v)_s$ . Akan tetapi pada proses inipun terjadi pula kenaikan suhu, sehingga ada penambahan volume, kecuali kalau  $\beta = 0$ . Dengan demikian maka hal ini akan memperkecil pengurangan volume secara keseluruhan. Hal ini tidak terjadi pada pemampatan isothermal. Oleh karena itu maka  $|(\partial v)_s| < |(\partial v)_T|$  pada kenaikan tekanan yang sama. Dengan kata lain  $\kappa_s < \kappa$ .

## 7. Penerapan pada Zat Murni

Hubungan-hubungan yang telah dijabarkan pada pembahasan sebelumnya dapat digunakan untuk menghitung entropi dan entalpi zat murni dari sifat-sifatnya yang dapat diukur secara langsung, yaitu  $c_p$  dan data  $p - v - T$ . Oleh karena suhu dan



tekanan adalah besaran-besaran yang paling mudah dikontrol dalam eksperimen, maka besaran-besaran itulah yang dipilih. Dari persamaan  $Tds$  yang kedua

$$ds = \frac{c_p}{T} dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dp$$

Jika pada keadaan acuan  $p_o$ ,  $v_o$ , dan  $T_o$ , nilai entropinya dinamakan  $s_o$ . Dan pada keadaan sembarang  $p$ ,  $v$  dan  $T$  dinamakan  $s$ , maka dengan pengintegralan diperoleh

$$s = \int_{T_o}^T \frac{c_p}{T} dT - \int_{p_o}^p \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dp + s_o \quad (8.42)$$

Oleh karena  $s$  adalah fungsi keadaan, maka perbedaan nilai pada dua keadaan seimbang hanya tergantung pada keadaan-keadaan itu dan sama sekali tidak tergantung pada jalan yang dilalui oleh proses tersebut. Jadi untuk menghitung perbedaan entropi pada Persamaan (8.42) dapat dipilih misalnya dua proses, yaitu proses isobarik pada tekanan  $p_o$  dari  $T_o$  ke  $T$ , dan yang kedua proses isothermal pada suhu  $T$  dari  $p_o$  ke  $p$ . Lebih lanjut pada tekanan  $p_o$ , kalor jenis  $c_p$  harus diketahui sebagai fungsi  $T$  dan pada suhu  $T$ ,  $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$  harus diketahui sebagai fungsi  $p$ . Sementara itu data eksperimental mengenai  $c_p$  seringkali hanya dapat digunakan pada tekanan  $p$  yang tidak sama dengan tekanan acuan  $p_o$ . Menghadapi hal ini, Persamaan (8.27) dapat digunakan

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T = -T \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p$$

bila persamaan ini diintegalkan pada suhu  $T$  yang tetap, diperoleh

$$c_{p_o} = c_p + T \int_{p_o}^p \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p dp \quad (8.43)$$

Untuk entalpi  $h$ , dapat pula digunakan cara yang sama dimulai dari Persamaan (8.30).

$$dh = c_p dT + \left[ v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \right] dp$$

Bila diintegalkan diperoleh

$$h = \int_{T_o}^T c_p dT + \int_{p_o}^p \left[ v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \right] dp + h_o \quad (8.44)$$

Sama halnya dengan entropi, maka disinipun dapat dipilih dua proses yaitu isobarik pada tekanan  $p_o$  yang tetap dari  $T_o$  ke  $T$ , dilanjutkan dengan proses isothermal pada suhu  $T$  yang tetap dari  $p_o$  sampai dengan  $p$ . Dalam hal inipun  $c_p$  pada tekanan  $p_o$  harus

diketahui sebagai fungsi  $T$  dan faktor dalam kurung pada suku kedua ruas kanan harus pula diketahui sebagai fungsi  $p$ .

Dari analisa di atas maka dapat disimpulkan bahwa entropi dan entalpi suatu sistem dapat ditentukan dari persamaan keadaannya dan kalor jenisnya sebagai fungsi suhu, dan keduanya dapat diukur secara eksperimental.

Dari Persamaan (8.11) dapat diperoleh bentuk

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - p = T \frac{\beta}{\kappa} - p$$

sebagai fungsi  $T$  dan  $v$ , maka

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_p dv$$

dan dari kedua persamaan ini dapat diperoleh

$$du = c_v dT + \left[ T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - p \right] dv \quad (8.45)$$

Bila diintegrasikan dengan batas integral yang sesuai

$$u = \int_{T_0}^T c_v dT + \int_{p_0}^p \left[ T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - p \right] dv + u_0 \quad (8.46)$$

## 8. Penerapan pada Gas Ideal

Untuk gas ideal Persamaan (8.42), (8.43) dan (8.44) dapat segera dihitung. Dari persamaan keadaannya

$$v = \frac{RT}{p} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p = 0$$

Persamaan (8.43) menjadi  $c_{p_0} = c_p$ , artinya nilai  $c_p$  sama untuk semua tekanan. Jadi  $c_p$  hanya merupakan fungsi suhu saja. Dari Persamaan (8.42) maka entropi gas ideal menjadi

$$s = c_p \int_{T_0}^T \frac{dT}{T} - R \int_{p_0}^p \frac{dp}{p} + s_0$$

atau

$$s = c_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{p}{p_0} + s_0 \quad (8.47)$$

Untuk menghitung perubahan entalpi gas ideal, dapat dimulai dari Persamaan (8.44) dengan mengisikan nilai  $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p}$ , sehingga menjadi

$$\int_{h_0}^h dh = \int_{T_0}^T c_p dT + \int_{p_0}^p \left[ v - \frac{RT}{p} \right] dp$$

Jika  $c_p$  dapat dianggap tetap, dan mengingat bahwa suku yang kedua ruas kanan sama dengan nol, maka hasilnya adalah

$$h = c_p(T - T_0) + h_0 \quad (8.48)$$

Untuk menghitung perubahan entropi gas ideal sebagai fungsi suhu dan volume dapat dimulai dari persamaan  $Tds$  dalam fungsi  $T$  dan  $v$ , yaitu

$$T ds = c_v dT + T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv$$

$$\int_{s_0}^s ds = \int_{T_0}^T c_v \frac{dT}{T} + R \int_{v_0}^v \frac{dv}{v}$$

Jika  $c_v$  dapat dianggap tetap, maka hasilnya adalah

$$s = c_v \ln \frac{T}{T_0} + R \ln \frac{v}{v_0} + s_0 \quad (8.49)$$

Untuk menyatakannya dalam fungsi  $v$  dan  $p$ , dimulai dari

$$T ds = c_p \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_p dv + c_v \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_v dp$$

$$ds = \frac{c_p}{T} \frac{p}{R} dv + \frac{c_v}{T} \frac{v}{R} dp$$

$$\int_{s_0}^s ds = c_p \int_{v_0}^v \frac{dv}{v} + c_v \int_{p_0}^p \frac{dp}{p}$$

$$s = c_p \ln \frac{v}{v_0} + c_v \ln \frac{p}{p_0} + s_0 \quad (8.50)$$

Energi dalam  $u$  gas ideal sebagai fungsi suhu dan tekanan dapat dicari sebagai berikut

$$u = h - pv = h - RT$$

dengan menggunakan Persamaan (8.48), diperoleh

$$u = c_p(T - T_0) + h_0 - RT$$

atau

$$u = (c_v + R)(T - T_0) + h_0 - RT$$

atau

$$u = c_v(T - T_0) + h_0 - RT_0$$

atau

$$u = c_v(T - T_0) + u_0 \quad (8.51)$$

Pada proses adiabatik reversibel (isentropik), entropi  $s$  tetap atau  $ds = 0$  dan rumus  $T ds$  yang ketiga menjadi

$$\begin{aligned} T ds = 0 &= c_p \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_p dv + c_v \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_v dp \\ c_p \frac{p}{R} dv + c_v \frac{v}{R} dp &= 0 \end{aligned}$$

jika ruas kiri dan kanan dikalikan  $\frac{R}{pv}$  akan dihasilkan

$$c_p \frac{dv}{v} + c_v \frac{dp}{p} = 0$$

Bila diintegrasikan tanpa batas integral, tetapi dengan menambahkan tetapan  $C$ , dihasilkan

$$c_p \ln v + c_v \ln p = \ln C$$

Jika persamaan terakhir ini dibagi dengan  $c_v$  akan dihasilkan

$$\ln p + \frac{c_p}{c_v} \ln v = \ln C$$

atau

$$\ln pv^\gamma = \ln C$$

sehingga

$$pv^\gamma = C \quad (8.52)$$

Kalor yang sudah diserap pada proses reversibel dapat pula dicari dari salah satu rumus  $Tds = \delta q$ . misalnya untuk proses isothermal reversibel dengan menggunakan rumus  $T ds$  pertama, didapat

$$\begin{aligned} T ds &= c_v dT + T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv \\ \delta q_T &= T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv_T = \frac{RT}{v} dv_T \end{aligned}$$

Jadi, kalor yang diserap

$$\delta q_T = p dv_T \quad (8.53)$$

## 9. Penerapan pada Gas Van der Waals

Cara perhitungan yang sama seperti yang sudah dibahas dalam bab sebelumnya, dapat pula diterapkan untuk gas Van der Waals. Nanti akan terlihat bahwa sifat-sifat gas nyata dapat dicari jika persamaan keadaan dan kalor jenisnya diketahui. Di sini dipilih gas Van der Waals karena secara relatif gas ini mempunyai persamaan keadaan yang lebih sederhana.

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$$

Oleh karena dari persamaan keadaan gas ini, volume  $v$  tak dapat dibuat eksplisit, maka sebaiknya jangan memilih tekanan dan suhu sebagai variabel bebas. Salah satu variabel bebas hendaknya dipilih  $p$  dan  $v$  atau  $T$  dan  $v$ .

Dari rumus  $Tds$  fungsi  $T$  dan  $v$  dapat ditulis

$$ds = \frac{c_v}{T} dT + \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dv$$

Karena  $ds$  adalah diferensial eksak, maka dari persamaan ini dapat ditulis

$$\frac{1}{T} \left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v$$

atau

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = T \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v \quad (8.54)$$

Hal ini sesuai dengan apa yang sudah dibahas pada subbab 5 (Beberapa Penerapan Rumus  $Tds$ ). Ruas kanan pada persamaan di atas untuk gas Van der Waals sama dengan nol, sebab pada tekanan  $p$  adalah linear dengan suhu  $T$  atau berbanding langsung dengan  $T$  pangkat satu. Karena itu ruas kiri juga sama dengan nol dan ini mengandung arti bahwa  $c_v$  gas Van der Waals pada suhu yang tetap bukan merupakan fungsi dari volume. Jadi  $c_v$  hanya merupakan fungsi suhu saja.

Dari persamaan keadaan gas Van der Waals

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v - b}$$

dan dari rumus  $Tds$

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv$$

dapat diperoleh

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + \frac{R}{v-b} dv$$

bila diintegalkan dengan batas yang sesuai dan  $c_v$  dianggap tetap

$$\int_{s_0}^s ds = c_v \int_{T_0}^T \frac{dT}{T} + R \int_{v_0}^v \frac{dv}{v-b}$$

atau

$$s = c_v \ln \frac{T}{T_0} + R \ln \frac{v-b}{v_0-b} + s_0 \quad (8.55)$$

Telah diperoleh, seperti pada Persamaan (8.49), bahwa

$$du = c_v dT + \left[ T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv$$

bila diterapkan pada gas Van der Waals, diperoleh

$$du = c_v dT + \left[ T \frac{R}{v-b} - p \right] dv$$

$$du = c_v dT + \frac{a}{v^2} dv$$

Bila diintegalkan dengan batas integral yang sesuai dan  $c_v$  dapat dianggap tetap, diperoleh

$$u = c_v(T - T_0) - a \left( \frac{1}{v} - \frac{1}{v_0} \right) + u_0 \quad (8.56)$$

Dari hasil di atas tampaklah bahwa hanya tetapan Van der Waals  $a$  saja yang muncul, sedangkan tetapan  $b$  tidak muncul. Tetapan  $a$  sebenarnya adalah merupakan koreksi terhadap sifat gas ideal yang didefinisikan sebagai gas yang molekul-molekulnya tidak tarik-menarik, apabila persamaan keadaannya hendak diterapkan pada gas nyata. Dengan demikian maka gas nyata juga mempunyai energi potensial dalam, sehingga berpengaruh terhadap energi dalam total  $u$ . Sementara itu tetapan  $b$  adalah merupakan koreksi terhadap sifat gas ideal yang didefinisikan sebagai gas yang molekul-molekulnya berbentuk titik matematis, yaitu mempunyai massa tetapi tidak mempunyai volume. Tetapan  $b$  berbanding lurus dengan volume yang ditempati oleh molekul-

molekul itu sendiri dan tidak menyangkut adanya interaksi antar molekul. Jadi tidak berpengaruh terhadap energi dalam  $u$ .

Selisih kalor jenis pada tekanan tetap dan pada volume tetap  $c_p - c_v$  menurut Persamaan (8.18) dan bila diterapkan pada gas Van der Waals adalah

$$c_p - c_v = \frac{\beta^2 v T}{\kappa} = R \frac{1}{1 - \frac{2a(v-b)^2}{RTv^3}}$$

Jika volume jenis  $v$  besar, maka  $b$  boleh diabaikan terhadap  $v$  dan secara pendekatan persamaan keadaannya boleh diambil sama dengan untuk gas ideal,  $pv = RT$ , sehingga persamaan tersebut menjadi lebih sederhana, yaitu

$$c_p - c_v \approx R \left( 1 + \frac{2ap}{R^2 T^2} \right) \quad (8.57)$$

Hubungan antara suhu  $T$  dengan volume jenis  $v$  pada proses adiabatik reversibel dapat diperoleh dari persamaan  $Tds$  bentuk pertama, dengan memberikan nilai tetap pada  $s$ , dan bila  $c_v$  juga boleh dianggap tetap, maka

$$c_v \ln T + R \ln(v - b) = \text{tetap}$$

atau

$$T(v - b)^{R/c_v} = \text{tetap} \quad (8.57)$$

Perlu dicermati bahwa untuk gas Van der Waals,  $R/c_v$  tidak sama dengan  $\gamma - 1$  seperti untuk gas ideal.

Rumus  $Tds$  juga dapat digunakan untuk menghitung kalor yang diserap pada proses isothermal reversibel. Dengan rumus  $Tds$  yang pertama, maka diperoleh

$$\delta q_T = T ds_T = RT \frac{dv_T}{v-b} \quad (8.58)$$

bila diintegrasikan dengan batas yang sesuai, diperoleh

$$q_T = RT \ln \frac{v_2 - b}{v_1 - b} \quad (8.59)$$

Perubahan energi dalam sudah didapatkan di atas, dan apabila diterapkan pada proses isothermal, maka

$$du_T = c_v dT_T + \frac{a}{v^2} dv_T = \frac{a}{v^2} dv_T \quad (8.60)$$

dari Persamaan (8.58) dan (8.60), dapat dihitung besar kerja pada proses isothermal.

$$\delta w_T = \delta q_T - du_T = \left( \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2} \right) dv_T$$

Bila diintegalkan diperoleh

$$w_T = RT \ln \frac{v_2 - b}{v_1 - b} + a \left( \frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right) \quad (8.61)$$

## 10. Penerapan pada Zat Cair atau Zat Padat yang Mengalami Tekanan Hidrostatik

Sifat-sifat zat cair atau zat padat dapat diketahui dengan melibatkan  $\beta$ ,  $\kappa$  dan  $c_p$  pada persamaan-persamaan umum sebagai fungsi  $T$  dan  $p$ ,  $T$  dan  $v$ , atau  $p$  dan  $v$ . Untuk zat cair dan zat padat,  $\beta$  dan  $\kappa$  adalah kecil sehingga dapat dianggap tetap. Jika  $\beta$  dan  $\kappa$  kecil maka ini berarti bahwa perubahan volumenya  $\partial v$  juga kecil, sehingga volume  $v$  dapat dianggap tetap dan sama dengan  $v_o$ . Jika dipilih  $T$  dan  $p$  sebagai variabel bebas, maka

$$dv = \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T dp = \beta v dT - \kappa v dp \quad (8.62)$$

Jika diintegalkan dari keadaan  $T_o, p_o$  ke keadaan  $T, p$ , diperoleh

$$v = v_o [1 + \beta(T - T_o) - \kappa(p - p_o)] \quad (8.63)$$

Entropi sebagai fungsi  $T$  dan  $p$  juga dapat dicari dari rumus  $Tds$  bentuk yang kedua, yang bila dibagi dengan  $T$  menjadi

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp \quad (8.64)$$

Telah didapatkan dari Persamaan (8.43) bahwa

$$c_{p_o} = c_p + T \int_{p_o}^p \left( \frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p dp$$

Secara pendekatan:  $\left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \beta v_o$ ;  $\left( \frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p = 0$  sehingga  $c_{p_o} = c_p$

Jika hasil terakhir ini dimasukkan ke dalam Persamaan (8.64) dan kemudian diintegalkan, diperoleh

$$s = c_p \ln \frac{T}{T_o} - \beta v_o (p - p_o) + s_o \quad (8.65)$$

untuk entalpi  $h$ , telah didapatkan dari Persamaan (8.44)

$$h = \int_{T_o}^T c_p dT + \int_{p_o}^p \left[ v - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp + h_o$$



dan ini akan memberikan hasil

$$h = c_p(T - T_o) + v_o(p - p_o) - \beta v_o \int_{p_o}^p T dp + h_o \quad (8.66)$$

Selisih kalor jenis dicari dari rumus

$$c_p - c_v = \frac{\beta^2 T v}{\kappa} \quad (8.67)$$

## 11. Koefisien Joule dan Joule-Thomson

Jika energi dalam  $u$  dinyatakan sebagai fungsi  $v$  dan  $T$ , yaitu  $u = u(u, T)$  atau  $f(u, v, T) = 0$ , maka

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = -\frac{\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_u}{\left(\frac{\partial T}{\partial u}\right)_v} = -\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_u$$

atau

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = -c_v \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_u$$

Definisi koefisien Joule:

$$\mathfrak{N} = \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_u \quad (8.68)$$

jadi dapat pula diperoleh hubungan

$$\mathfrak{N} = -\frac{1}{c_v} \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T \quad (8.69)$$

Jika  $h$  diketahui sebagai fungsi  $p$  dan  $T$  atau  $f(h, p, T) = 0$ , maka

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = -\frac{\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h}{\left(\frac{\partial T}{\partial h}\right)_p} = -\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h$$

atau

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = -c_p \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h$$

Definisi koefisien Joule-Thomson:

$$\mu = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h \quad (8.70)$$

Dengan persamaan sebelumnya dapat pula diperoleh hubungan

$$\mu = -\frac{1}{c_p} \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T \quad (8.71)$$

$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T$  dan  $\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T$  dapat dihitung dari persamaan keadaan dan gabungan hukum pertama dan kedua. Dari Persamaan (8.11) dan (8.14) sudah didapatkan

$$\begin{aligned}\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T &= T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - p \\ \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T &= -T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p + v\end{aligned}$$

untuk gas Van der Waals

$$\begin{aligned}\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T &= \frac{a}{v^2} \\ \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T &= \frac{RTv^3b - 2av(v-b)^2}{RTv^3 - 2a(v-b)^2}\end{aligned}$$

karena itu untuk gas Van der Waals dalam ekspansi Joule

$$\mathfrak{N} = \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_u = -\frac{1}{c_v} \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = -\frac{a}{c_v v^2}$$

Pada perubahan volume yang terhingga, maka dengan mengintegrasikan persamaan ruas kedua dengan ruas keempat (terakhir) diperoleh

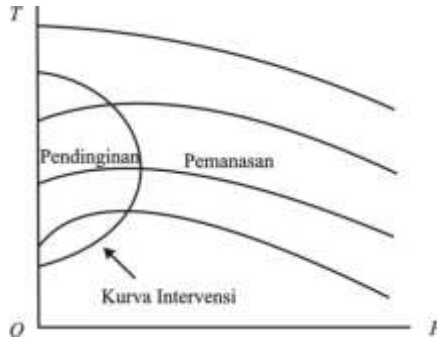
$$T_2 - T_1 = \frac{a}{c_v} \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1}\right) \quad (8.73)$$

Untuk gas ideal,  $a = 0$ , sehingga  $T_2 = T_1$  yang berarti bahwa pada ekspansi bebas gas ideal tidak mengalami perubahan suhu. Untuk gas nyata, karena  $v_2 > v_1$  maka ruas kanan pada Persamaan (8.73) menjadi negatif, sehingga ini berarti bahwa  $T_2 < T_1$ . Jadi pada ekspansi bebas gas nyata mengalami penurunan suhu.

Untuk gas Van der Waals yang menjalani ekspansi Joule-Thomson

$$\mu = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = -\frac{1}{c_p} \frac{RTv^3b - 2av(v-b)^2}{RTv^3 - 2a(v-b)^2} \quad (8.74)$$

Proses isentalpik ( $h = \text{tetap}$ ) untuk gas nyata pada diagram  $T$ - $p$  diperlihatkan pada Gambar 8.1. Titik-titik pada kurva yang berkaitan dengan suhu maksimum disebut titik inversi. Semua titik inversi ini jika dihubungkan, akan membentuk suatu kurva yang disebut kurva inversi. Ekspansi di kawasan sebelah kanan titik inversi menyebabkan suhu naik, tetapi di sebelah kiri titik inversi menyebabkan suhu turun.



**Gambar 8.2.** Kurva isentalpik dan kurva inversi gas nyata

Kurva inversi merupakan tempat kedudukan titik-titik yang berkaitan dengan  $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = 0$ . Bila suhu inversi diberi lambang  $T_i$ , maka dari Persamaan (8.74) diperoleh

$$T_i = \frac{2a(v-b)^2}{Rv^2b} \quad (8.75)$$

Hubungan antara tekanan inversi  $p_i$  dengan suhu inversi  $T_i$  diperoleh dengan cara mengeliminasi  $v$  dari persamaan ini dengan persamaan keadaannya. Kurva seperti yang diperoleh di atas mempunyai bentuk umum yang sama untuk gas nyata yang sudah diamati, walaupun secara numerik tidak terlalu sesuai.

Dari pembahasan di atas dapat disimpulkan, bahwa apabila efek Joule-Thomson akan digunakan untuk mencairkan gas, maka gas itu mula-mula harus didinginkan di bawah suhu inversi maksimum, yang terjadi bila tekanan kecil dan volume jenisnya besar. Karena itu  $(v - b)$  dalam Persamaan (8.75) dapat disamakan dengan  $v$ , sehingga untuk gas Van der Waals

$$T_i(\text{maks}) = \frac{2a}{Rb} \quad (8.76)$$

## 12. Tabel P. W. Bridgman

Soal-soal yang bersangkutan dengan turunan parsial dari suatu variabel keadaan, dapat diselesaikan dengan rumus-rumus yang sudah dibicarakan di atas, seperti rumus  $Tds$  dan lain-lain. Namun pada umumnya cara ini sering kali memerlukan penyelesaian yang panjang. Ada cara yang tidak memerlukan penyelesaian yang panjang, yaitu dengan menggunakan Tabel Bridgman.

Pada umumnya turunan parsial dari suatu variabel keadaan system termodinamik terhadap sembarang variabel keadaan yang lain, disertai dengan anggapan bahwa variabel keadaan yang ketiga adalah tetap. Misalnya  $(\partial u/\partial v)_T$  dan ini sesuai dengan apa yang sudah dibahas dalam Bab 4 (Turunan Parsial dalam Termodinamika) dapat dirumuskan sebagai

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T}{\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T}$$

Bila diamati, maka seolah-olah pembilang  $\partial u$  dan penyebut  $\partial v$  dibagi dengan sesuatu yang sama, yaitu  $\partial p$ . Menurut matematika, sesuatu itu boleh apa saja asal sama. Oleh karena itu untuk keperluan pembuatan tabel, persamaan di atas ditulis menjadi

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = \frac{(\partial u)_T}{(\partial v)_T} \quad (8.77)$$

Di bawah ini dicantumkan Tabel Bridgman,

**Tabel 8.1.** Tabel Bridgman

<u><math>p</math> tetap</u>	<u><math>T</math> tetap</u>
$(\partial T)_p = 1$	$(\partial p)_T = -1$
$(\partial v)_p = \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$	$(\partial v)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$
$(\partial s)_p = \frac{c_p}{T}$	$(\partial s)_T = \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$
$(\partial q)_p = c_p$	$(\partial q)_T = T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$
$(\partial w)_p = p \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$	$(\partial w)_T = -p \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$
$(\partial u)_p = c_p - p \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$	$(\partial u)_T = T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p + p \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$
$(\partial h)_p = c_p$	$(\partial h)_T = -v + T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$
$(\partial g)_p = -s$	$(\partial g)_T = -v$
$(\partial f)_p = -s - p \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$	$(\partial f)_T = p \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$

### h tetap

$$(\partial p)_h = -c_p$$

$$(\partial T)_h = v - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

$$(\partial v)_h = -c_v \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p^2 + v \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

$$(\partial s)_h = \frac{vc_p}{T}$$

$$(\partial q)_h = vc_p$$

$$(\partial w)_h = -p \left[ c_p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T + \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p^2 - \right.$$

$$\left. v \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right]$$

### s tetap

$$(\partial p)_s = -\frac{c_p}{T}$$

$$(\partial T)_s = -\left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

$$(\partial v)_s = -\frac{1}{T} \left[ c_p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T + T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p^2 \right]$$

$$(\partial q)_s = 0$$

$$(\partial w)_s = -\frac{p}{T} \left[ c_p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T + T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p^2 \right]$$

$$(\partial u)_s = \frac{p}{T} \left[ c_p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T + T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p^2 \right]$$

$$(\partial h)_s = -\frac{vc_p}{T}$$

$$(\partial g)_s = -\frac{1}{T} \left[ vc_p - sT \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right]$$

$$(\partial f)_s = \frac{1}{T} \left[ pc_p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T + pT \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T^2 + sT \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right]$$

### g tetap

$$(\partial p)_g = s$$

$$(\partial T)_g = v$$

$$(\partial v)_g = v \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p + s \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$$

$$(\partial s)_g = \frac{1}{T} \left[ vc_p - sT \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right]$$

$$(\partial q)_g = -sT \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p + vc_p$$

$$(\partial w)_p = p \left[ v \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p + s \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \right]$$

### v tetap

$$(\partial p)_v = -\left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

$$(\partial T)_v = \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$$

$$(\partial s)_v = \frac{1}{T} \left[ c_p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T + T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p^2 \right]$$

$$(\partial q)_v = c_p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T + T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p^2$$

$$(\partial w)_v = 0$$

$$(\partial u)_v = c_p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T + T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p^2$$

$$(\partial h)_v = c_p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T + T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p^2 - v \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

$$(\partial g)_v = -v \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - s \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$$

$$(\partial f)_v = s \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$$

## D. Contoh Soal



Contoh

8.1

(a) Hitunglah  $c_p - c_v$  untuk air raksa pada suhu  $0^\circ\text{C}$  dan tekanan 1 atm, jika  $\beta = 17,5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  dan  $\kappa = 38,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ . Massa jenis air raksa  $13,6 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$  dan berat atom  $200,6 \text{ kg kmol}^{-1}$ . (b) Tentukanlah nilai  $(c_p - c_v)/3R$ .

### Penyelesaian

Diketahui:  $\beta = 17,5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

$$\kappa = 38,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1};$$

Ditanya: (a) Hitunglah  $c_p - c_v$

(b) Tentukanlah nilai  $(c_p - c_v)/3R$ .

Jawab

Rumus yang digunakan:  $c_p - c_v = \frac{\beta^2 v T}{\kappa} = \frac{\beta^2 T}{\kappa \rho}$  dan  $\frac{c_p - c_v}{3R}$

(a) Dengan rumus:  $c_p - c_v = \frac{\beta^2 v T}{\kappa} = \frac{\beta^2 T}{\kappa \rho}$ , dapat segera diperoleh

$$c_p - c_v = \frac{(17,5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1})^2 (273 \text{ K})}{(38,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1})(13,6 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3})}$$

$$c_p - c_v = 15,97 \text{ J K}^{-1} = (15,97 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1})(200,6 \text{ kg kmol}^{-1})$$

$$c_p - c_v = 3203,6 \text{ J K}^{-1} \text{ kmol}^{-1}$$

$$(b) \frac{c_p - c_v}{3R} = \frac{3203,6 \text{ J K}^{-1} \text{ kmol}^{-1}}{3(8,314 \times 10^3 \text{ J K}^{-1} \text{ kmol}^{-1})}$$

Jadi nilai

$$\frac{c_p - c_v}{3R} = 0,128$$

Periksa Kembali



Contoh

8.2

Persamaan keadaan suatu gas adalah:  $(p + b)v = RT$ .

- (a) Carilah selisih kalor jenis  $c_p - c_v$  gas ini!
- (b) Carilah perubahan entropi  $\Delta s$  pada suhu tetap!

### Penyelesaian

*Diketahui:*  $(p + b)v = RT$

*Ditanya:* (a) Carilah selisih kalor jenis  $c_p - c_v$  gas ini!

(b) Carilah perubahan entropi  $\Delta s$  pada suhu tetap!

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*  $c_p - c_v = \frac{\beta^2 v T}{\kappa}$  dan  $v = \frac{RT}{p+b}$

(a) Menurut rumus:  $c_p - c_v = \frac{\beta^2 v T}{\kappa}$  dan persamaan keadaan:  $v = \frac{RT}{p+b}$

$$\beta = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{v} \frac{RT}{p+b} = \frac{1}{T}$$



$$x = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = -\frac{1}{v} \frac{-RT}{(p+b)^2} = \frac{1}{p+b}$$

$$x = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = -\frac{1}{v} \frac{-RT}{(p+b)^2} = \frac{1}{p+b}$$

Jadi, selisih kalor jenisnya

$$c_p - c_v = \frac{Tv(p+b)}{T^2} = \frac{v}{T}(p+b) = R$$

$$(b) T ds = c_p dT - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp$$

$$T ds_T = -Tv\beta dp_T = -\frac{Tv}{T} dp_T = -v dp_T \quad (A)$$

Jika persamaan keadaannya didiferensialkan pada suhu tetap, maka  $(p+b)dv_T + v dp_T = 0$ , atau  $v dp_T = -(p+b)dv_T$ .

Hasil ini dimasukkan ke dalam Persamaan (A) dan dibagi dengan  $T$  sementara indeks  $T$  dihilangkan, maka diperoleh

$$ds = \frac{1}{T}(p+b)dv = R \frac{dv}{v}$$

Jika hasil ini diintegrasikan dari keadaan 1 ke keadaan 2, maka

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Periksa  
Kembali





Buktikanlah dengan (a) cara biasa dan (b) menggunakan tabel Bridgman,

$$\text{bahwa } \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T = \kappa p v - \beta T v$$

### Penyelesaian

$$\text{Diketahui: } \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T = \kappa p v - \beta T v$$

Ditanya: (a) cara biasa

$$(b) \text{ menggunakan tabel Bridgman, bahwa } \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T = \kappa p v - \beta T v$$

Jawab

$$\text{Rumus yang digunakan: } ds = \frac{1}{T} (du + p dv)$$

(a) Dari hukum pertama dan kedua (cara biasa)

$$ds = \frac{1}{T} (du + p dv)$$

$$ds = \frac{1}{T} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T dp + \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p dT \right] + \frac{p}{T} \left[ \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T dp + \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dT \right]$$

$$ds = \frac{1}{T} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \right] dp + \frac{1}{T} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p + p \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dT$$



Sebagai fungsi  $p$  dan  $T$  dapat pula ditulis

$$ds = \left( \frac{\partial s}{\partial p} \right)_T dp + \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_p dT$$

Kedua persamaan terakhir ini adalah identik, sehingga

$$\left( \frac{\partial s}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{T} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \right] \quad (\text{A})$$

$$\left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{T} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p + p \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] \quad (\text{B})$$

Jika Persamaan (1) didiferensialkan terhadap  $T$  dan Persamaan (B) terhadap  $p$ , maka ruas kiri kedua persamaan menjadi sama, sehingga ruas kananpun harus sama. Ruas kanan pada kedua persamaan mengandung beberapa suku yang sama sehingga saling melenyapkan. Hasilnya adalah

$$\left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T + p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = -T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

Jika suku kedua pada ruas kiri dipindah ke kanan, diperoleh

$$\left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T = \kappa p v - \beta T v$$

(b) Dengan menggunakan tabel Bridgman

$$\left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T = \left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T = \frac{T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p + p \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T}{-1}$$

atau

$$\left( \frac{\partial u}{\partial p} \right)_T = \kappa p v - \beta T v$$

Periksa  
Kembali



## E. Soal Latihan



Latihan

1

Nyatakanlah  $\left(\frac{\partial h}{\partial V}\right)_T$  dalam bentuk standar (a) dengan cara biasa dan (b) dengan cara Bridgman.

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Buktikanlah bahwa untuk gas Van der Waals, koefisien Joule-Thompson dapat

dinyatakan 
$$\mu = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_h = - \frac{1}{c_p} \frac{RTv^3b - 2av(v-b)^2}{RTv^3 - 2a(v-b)^2}$$

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Andaikan untuk gas ideal  $c_p = a + bT$ , ( $a$  dan  $b$  tetapan). Carilah (a)  $c_v$  dan (b) entropi.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Buktikan bahwa  $\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_s = c_p \left(\frac{\partial \ln T}{\partial \ln v}\right)_p$

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Jabarkan  $h(T,v)$  untuk gas sempurna

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali





Andaikan untuk gas sempurna  $c_p = a + bT$ , ( $a$  dan  $b$  tetapan). Tentukan entalpi gas ini.

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Jabarkan  $h(p,v)$  untuk gas sempurna

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali

## F. Tugas



Tugas

1

Buktikanlah bahwa:

$$(a). T \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_h = \frac{c_p}{1 - \beta T}$$

$$(b). \left( \frac{\partial s}{\partial p} \right)_h - \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_s = -\frac{v}{c_p}$$

Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Buktikanlah bahwa selisih antara keterampilan isothermal dengan keterampilan adiabatik adalah

$$\kappa - \kappa_s = \frac{T\beta^2 v}{c_p}$$

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Buktikanlah bahwa untuk sistem  $p$ - $v$ - $T$ :

$$(a). u = -T^2 \left( \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{f}{T} \right) \right)_v$$

$$(b). \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = T^2 \left( \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{p}{T} \right) \right)_v$$

$$(c). \left( \frac{\partial u}{\partial s} \right)_T = -p^2 \left( \frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{T}{p} \right) \right)_v$$

Diketahui bahwa fungsi helmholtz  $f = u - Ts$

#### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Arus listrik sebesar 25 A mengalir selama satu detik dalam suatu hambatan sebesar 40 ohm, sementara itu suhu dijaga supaya tetap sebesar  $27^{\circ}\text{C}$ . (a) Berapakah perubahan entropi pada hambatan? (b) Berapakah perubahan entropi semestanya?

### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



Tekanan pada sebuah balok tembaga pada suhu  $0^{\circ}\text{C}$  dinaikkan secara isotermal dan reversibel dari 1 atm sampai 1000 atm. Diandaikan bahwa  $\beta$ ,  $\kappa$ , dan  $\rho$  adalah tetapan dan berturut-turut besarnya sama dengan  $5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $8 \times 10^{-12} \text{ N}^{-1} \text{ m}^2$  dan  $8,9 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ . Hitunglah (a) Usaha yang dilakukan pada tembaga tiap kg dan (b) kalor yang terlibat dalam proses. (c) bagaimana menerangkannya bahwa menurut kenyataan kalor yang terlibat adalah lebih besar dari pada usaha yang dilakukan? (d) berapakah kenaikan suhu tembaga, apabila pemampatan itu secara adiabatik bukan isotermal? Jelaskan tentang pendekatan yang telah dilakukan.

#### Penyelesaian



*Diketahui:*

*Ditanya:*

*Jawab*

*Rumus yang digunakan:*

Jadi



Periksa  
Kembali



## DAFTAR PUSTAKA

- Alonso, Marcelo., dkk. 1992. *Dasar-Dasar Fisika Universitas*. Jakarta: Erlangga
- Boas, Mary L. 1976. *Mathematical Methods In The Physical Sciences*. New York: John Willey and Sons.
- Bueche, Frederick J. dan Hecht, Eugene. 2006. *Fisika Universitas Edisi 10*. Jakarta: Erlangga
- Hadi, Dimsiki. 1993. *Termodinamika*. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi.
- Halliday dan Resnick. 1991. *Fisika Jilid I*. Jakarta: Erlangga
- Jati, Bambang Murdaka Eka. 2011. *Matematika untuk Ilmu Fisika & Teknik*. Yogyakarta: Andi.
- Mahardika, Andi Ichsan. 2015. *Termodinamika*. Surabaya: Revka Petra Media.
- Sutrisno dan Tan Ik Gie. 1983. *Seri Fisika Dasar (Listrik, Magnet dan Termofisika Listrik)*. Bandung: ITB.
- Sears, Francis W. 1986. *Thermodynamics, Kinetic Theory, and Statistical Thermodynamics*. Sydney: Addison-Wesley Publishing Company.
- Serway, R. A. dan Jewett, J.W. 2004. *Physics for Scientists and Engineers 6 th Edition*. USA: Thomson Brooks/Cole
- Tipler, P.A.1998. *Fisika untuk Sains dan Teknik-Jilid I*. Jakarta: Erlangga
- Zemansky, Mark W. & Dittman, Richard H. 1986. *Kalor dan Termodinamika*. Bandung: ITB.
- Zemansky, Sears. 2000. *Fisika untuk Universitas I*. Jakarta: Erlangga.



## *Tentang Penulis*



*Muhammad Arifuddin Jamal.*

Lahir tanggal 1 Oktober 1962 di Kuduk, Kabupaten Selayar, Sulawesi Selatan. Tamat Sarjana Pendidikan Fisika di Jurusan Fisika FMIPA IKIP Ujung Pandang (sekarang Universitas Negeri Makassar) tahun 1987 dan Meraih Gelar Magister Pendidikan Sains Konsentrasi Pendidikan Fisika di Program Pascasarjana Universitas Negeri Surabaya tahun 2009.

Saat ini aktif sebagai dosen di Program Studi Pendidikan Fisika FKIP Universitas Lambung Mangkurat Banjarmasin. Bidang Fisika yang ditekuni adalah Fisika Dasar, Termodinamika, dan Fisika Modern.



*Andi Ichsan Mahardika.*

Lahir tanggal 31 Maret 1985 di Ujung Pandang, Sulawesi Selatan. Tamat Sarjana Pendidikan Fisika di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Makassar tahun 2007 dan Meraih Gelar Magister Pendidikan Fisika di Program Pascasarjana Universitas Negeri Makassar tahun 2011.

Saat ini penulis aktif sebagai dosen di Program Studi Pendidikan Fisika FKIP Universitas Lambung Mangkurat Banjarmasin. Bidang Fisika yang ditekuni adalah Fisika Inti, Termodinamika, serta Gelombang dan Optika. Pada bidang Pendidikan Fisika, penulis menekuni dan meneliti penalaran, pemecahan masalah dan multi inteligensi siswa dalam pembelajaran fisika.