



TERMODINAMIKA TEKNIK

Dasar-Dasar Konservasi Energi

Bagian 1

Penulis: Haryono

**TERMODINAMIKA TEKNIK
DASAR-DASAR KONSERVASI ENERGI
BAGIAN 1**

UU No. 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta pada Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Perlindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- I. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual.
- II. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan
- III. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- IV. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

- Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan /atau pidana denda paling banyak Rp 100.000 (seratus juta rupiah).
- Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000 (lima ratus juta rupiah).

**TERMODINAMIKA TEKNIK
DASAR-DASAR KONSERVASI ENERGI
BAGIAN 1**

**PENULIS:
Haryono**



2025

**TERMODINAMIKA TEKNIK
DASAR-DASAR KONSERVASII ENERGI
BAGIAN 1**

Jumlah halaman : viii, 145 halaman

Ukuran halaman : 15,5 x 23 cm

ISBN e-book: 978-602-7989-73-3 (PDF)

Penulis:

Haryono

Desain Cover:

Alifia Marsya

**Hak Cipta dilindungi Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014
tentang Hak Cipta.**

Siapapun dilarang keras menerjemahkan, mencetak, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penulis dan penerbit.

Cetakan pertama:

Mei 2025

Diterbitkan oleh:

Universitas Bakrie Press

Penerbit Anggota IKAPI No. 638/Anggota Luar Biasa/DKI/2024



Komplek Rasuna Epicentrum
Jl. HR. Rasuna Said, Setiabudi,
Kuningan
Jakarta 12920

Kata Pengantar

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa Penulis haturkan dengan telah selesai disusunnya buku ajar dengan judul TERMODINAMIKA TEKNIK: Dasar-Dasar Konversi Energi (Bagian-1) ini. Buku ajar ini merupakan bagian ke-1 dari 2 bagian. Buku ajar ini telah diusahakan disusun secara hirarkis, dari materi-materi yang bersifat mendasar menuju ke materi-materi yang sifatnya lebih kompleks dan aplikatif, dan dengan bahasa sederhana. Oleh karena itu, pemahaman materi-materi yang disajikan pada bagian lebih awal, relatif sangat dituntut untuk dikuasai dengan baik sebagai modal untuk memahami materi-materi selanjutnya.

Harapan Penulis, semoga buku ajar ini memberikan manfaat bagi mahasiswa dan pihak-pihak lain yang berkepentingan. Kritik dan saran sangat Penulis harapkan demi perbaikan dalam banyak hal terkait dengan penyempurnaan buku ajar ini.

Bandung, Mei 2025

Penulis

Prakata

Buku ajar TERMODINAMIKA TEKNIK: Dasar-Dasar Konversi Energi (Bagian-1) ini disusun dengan sasaran bagi mahasiswa, khususnya mahasiswa teknik kimia dan teknik mesin, sebagai pendamping dalam mempelajari *textbook* terkait termodinamika teknik yang biasanya disajikan di dalam bahasa Inggris.

Buku ajar ini membahas secara terstruktur dan ringkas mengenai dasar-dasar teori dalam termodinamika yang diperlukan dalam aspek-aspek konversi energi. Dasar-dasar teori mengenai konsep dasar termodinamika sampai hukum-hukum termodinamika dibahas dalam buku ajar ini.

Pembaca diharapkan membaca dan memahami secara cermat, dan mencoba mengukur pemahaman dengan mencoba menyelesaikan soal-soal latihan yang telah disajikan di bagian akhir di setiap babnya.

Ucapan terima kasih saya ucapkan kepada semua pihak yang telah membantu terealisasinya penerbitan buku ajar ini.

Daftar Isi

Kata Pengantar	iv
Prakata.....	v
Daftar Isi	vi
I. PENDAHULUAN.....	1
II. KONSEP DASAR TERMODINAMIKA	7
A. Sistem dan Sifat Termodinamika.....	7
B. Besaran Termodinamika dan Satuannya	12
C. Satuan dengan “prefik/awalan multiple”	24
D. Fungsi Termodinamika	25
III. BENTUK-BENTUK ENERGI.....	32
A. Tinjauan Umum Energi.....	32
B. Kerja	36
C. Energi Potensial Gravitasi dan Energi Kinetik	43
D. Panas	46
IV. DIAGRAM & TABEL TERMODINAMIKA.....	63
A. Tinjauan Umum.....	63
B. Fasa dan Aturan Fasa	64
C. Diagram Termodinamika	71
D. Tabel Termodinamika.....	77
V. PERSAMAAN KEADAAN.....	83
A. Fluida kerja dan Diagram P-V-T	83
B. Persamaan Keadaan Gas Ideal	85
C. Persamaan Keadaan Gas Nyata	88

D. Persamaan Keadaan pada Fluida Cair	98
VI. HUKUM I TERMODINAMIKA	106
A. Pengantar	106
B. Definisi dan Jenis-Jenis Proses Termodinamika	107
C. Neraca Energi.....	110
D. Kapasitas Panas	114
E. Hubungan C_p , C_v dan R pada Gas Ideal	116
F. Evaluasi Berbagai Proses Termodinamika dengan Hukum I Termodinamika.....	117
G. Panas Reaksi Kimia.....	125
Daftar Pustaka	135
Lampiran.....	136
Biografi Penulis.....	146

I. PENDAHULUAN

Istilah termodinamika berasal dari bahasa Yunani, yaitu “*therme*” yang berarti panas (*heat*) dan “*duramis*” yang berarti tenaga (*power*). Termodinamika adalah cabang ilmu fisika yang mempelajari tentang pengaruh-pengaruh dari perumateri suhu, tekanan, dan volum terhadap sifat-sifat fisik dari sistem pada skala makroskopik. Termodinamika, menurut dasar dan orientasi kajiannya, secara umum dapat dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu: termodinamika klasik (*classical thermodynamics*), termodinamika statistik (*statistical thermodynamics*), dan termodinamika kimia (*chemical thermodynamics*).

Termodinamika klasik merupakan ilmu termodinamika yang mempelajari hal-hal yang terkait dengan keadaan-keadaan/kondisi termodinamika; sifat-sifat dari energi, kerja, dan panas; dan hal-hal yang terkait dengan hukum-hukum termodinamika. Termodinamika klasik dikembangkan berdasarkan atas postulat Robert Boyle (1662). Postulat tersebut menyatakan bahwa besarnya kuantitas tekanan yang diberikan oleh gas, bervariasi secara terbalik dengan volumenya pada suhu konstan. Dari postulat inilah kemudian ilmu tentang panas mulai berkembang. Hukum I dan II termodinamika akhirnya muncul secara simultan pada tahun 1850an. Hukum-hukum termodinamika tersebut merupakan andil pemikiran dari William Rankine, Rudolf Clausius, dan William Thomson.

Termodinamika statistik berkembang pada akhir abad ke-19 seiring dengan perkembangan teori atom dan molekul. Berdasarkan konsep termodinamika klasik ini, disimpulkan bahwa termodinamika mampu memberikan suatu interpretasi molekuler terhadap sistem. Termodinamika statistik merupakan upaya untuk menjembatani antara sifat-sifat mikroskopik dan makroskopik dari sistem. Pada termodinamika statistik ini, sifat-sifat makroskopik (tekanan, suhu, volum, energi, entropi, dan lain-lainnya) dari sistem akan diprediksi atau didekati dari sifat-sifat gerakan partikel dan interaksi antar partikel penyusun sistem makronya, melalui tinjauan mekanisme statistik tertentu.

Sedangkan termodinamika kimia mempelajari interrelasi antara panas dan reaksi kimia. Kemunculan termodinamika kimia dipelopori oleh Willard Gibbs pada sekitar tahun 1873-1876, dengan papernya yang sangat terkenal, yaitu: *On The Equilibrium of Heterogeneous Substances*. Paper tersebut secara prinsip menyatakan bahwa kespontanan keberlangsungan suatu proses dapat ditentukan berdasarkan energi, entropi, volum, suhu, dan tekanan dari sistem termodinamikanya. Pada masa-masa selanjutnya (selama awal abad ke-20), ahli kimia seperti Gilbert Lewis, Merle Randall, dan E.A. Guggenheim mulai mengaplikasikan metode matematika Gibbs untuk menganalisis proses-proses kimia.

Menurut sejarahnya, ilmu termodinamika muncul pada abad ke-19, dimana pada saat itu termodinamika dibutuhkan untuk mendeskripsikan pengoperasian mesin uap dan untuk menentukan batas-batas bagi penyempurnaan (peningkatan efisiensi) mesin uap berikutnya. Oleh karena itu, nama termodinamika sendiri menunjukkan pembangkitan tenaga dari panas, dengan aplikasi nyata berupa mesin-mesin panas (*heat engines*), misalnya mesin uap.

Termodinamika merupakan kajian tentang berbagai bentuk energi (energi potensial, energi kinetik, energi listrik, panas, kerja dan bentuk energi lainnya), sifat-sifat dari media/fluida yang dipakai dan proses-proses yang dilibatkan. Termodinamika juga mempelajari konversi atau pengumateri bentuk energi dari bentuk energi yang satu menjadi bentuk energi yang lainnya. Dalam pendefinisianya, kata “termodinamika” sering dikaitkan dengan penggunaan istilah-istilah energi (bentuk energi pada umumnya), panas dan kerja.

Termodinamika memainkan peranan yang penting dalam semua cabang ilmu *engineering*, ilmu fisika, kimia dan biologi. Hal ini disebabkan salah satunya oleh karena, energi yang merupakan bagian penting dalam termodinamika, dapat diperoleh dari listrik, materi kimia, nuklir dan materi atau cara-cara lainnya. Sedangkan dalam kehidupan modern, termodinamika memegang peranan yang luas dan penting. Sebagai contoh peranan termodinamika dalam kehidupan modern adalah penemuan mesin jet modern yang dimanfaatkan pada pesawat terbang komersial, penemuan dan

pemanfaatan mesin turbin otomotif, pengkonversian secara langsung energi panas matahari (*solar energy*) menjadi energi listrik dan pemanfaatannya untuk pemanasan air, penemuan dan pemanfaatan mesin diesel, mesin bensin, pembangkitan energi listrik dan mekanik dengan pemanfaatan reaksi inti/nuklir, refrijerasi dan lain sebagainya.

Terkait dengan profesi insinyur kimia, insinyur kimia harus mampu mengatasi masalah-masalah dengan rentang jenis yang beragam dalam pelaksanaan profesinya. Di antara masalah-masalah tersebut adalah penghitungan kebutuhan panas dan kerja bagi proses-proses fisika dan kimia, dan penentuan kondisi kesetimbangan pada reaksi kimia maupun pada perpindahan komponen-komponen kimia antar fasa. Insinyur kimia selalu berurusan dengan banyak materi kimia, dan pada suatu kondisi tertentu sering menjumpai masalah ketidakcukupan data. Dalam hal-hal yang telah disebutkan terkait dengan tugas keprofesian insinyur kimia tersebut, termodinamika sangat membantu, dan memegang peranan penting.

Contoh-contoh aplikasi dan peranan termodinamika dalam kehidupan nyata kemanusiaan, sebagian dibahas dalam buku ajar ini, antara lain adalah: mesin-mesin penghasil kerja (mesin bensin, mesin diesel, unit pembangkit tenaga uap, turbin gas dan turbo jet), refrijerasi (pendinginan pada suhu rendah) dan peranan termodinamika dalam konversi antar berbagai bentuk energi.

Gambar 1.1 dan Gambar 1.2 menunjukkan contoh-contoh aplikasi termodinamika di industri pembangkit listrik.



Gambar 1. 1 Unit pembangkit tenaga uap
(<https://renewablesnow.com/news>)



Gambar 1. 2 Boiler tipe Coaliser HPD
(<https://www.hurstboiler.com/cad>)

Gambar 1.1 mengilustrasikan pembangkitan tenaga listrik dengan memanfaatkan energi yang terkandung di dalam uap air untuk menggerakkan turbin. Energi mekanik turbin selanjutnya dimanfaatkan untuk menggerakkan generator, sehingga energi

listrik dapat dibangkitkan. Pada unit pembangkit tenaga uap (*steam power plant*) tersebut, uap air sebagai fluida kerja akan mengalami perlakuan siklik yang dikenal sebagai siklus Rankine. Sedangkan Gambar 1.2 menunjukkan sebuah boiler tipe Coal Miser HPD. Boiler merupakan alat untuk menghasilkan uap air dengan kualitas uap tertentu. Dengan demikian, boiler merupakan salah satu alat yang diperlukan dalam unit pembangkit tenaga uap. Kapasitas dari boiler tipe Coal Miser HPD sekitar dengan 5.000–40.000 lb_m uap air/jam, dengan tekanan uap keluaran sebesar 150 sampai 250 Psi.

II. KONSEP DASAR TERMODINAMIKA

A. Sistem dan Sifat Termodinamika

Aplikasi termodinamika pada banyak masalah-masalah nyata dimulai dengan pengidentifikasian fakta dari bagian materi/materi/zat sebagai pusat perhatian. Bagian materi/materi/zat yang dijadikan pusat perhatian atau pengamatan tersebut dikenal sebagai sistem. Istilah sistem, menurut satu literatur, muncul pada pengaplikasian hukum pertama termodinamika terhadap suatu jenis proses yang dievaluasi, yang menyatakan bahwa lingkup pengaruh dari akibat kelangsungan suatu proses dibagi menjadi dua bagian, yaitu sistem dan lingkungan. Daerah dimana proses terjadi, secara terpisah ditentukan sebagai sistem, dan segala sesuatu yang berinteraksi dengan sistem adalah lingkungan. Antara sistem dan lingkungan dipisahkan oleh pembatas. Batas dapat berupa batas nyata/rirel atau khayal/imajiner, kaku atau fleksibel. Contoh kasus untuk menunjukkan perbedaan antara batas nyata dengan batas khayal adalah sebagai berikut:

- Kompresi udara dalam silinder berpiston (udara merupakan sistem, dinding silinder dan piston merupakan bidang batas riil/nyata)
- Emulsi minyak dalam air (bidang batas berupa batas imajiner/khayal, misalkan butir-butir minyak sebagai sistem dikelilingi oleh air sebagai lingkungan)

Sistem dikatakan berada dalam kontak dengan lingkungan, jika suatu perumateri di lingkungan dapat menyebabkan perumateri di dalam sistem. Kontak antara sistem dengan lingkungan dapat berupa **kontak mekanik** dan atau **kontak termal**. Sistem dalam kontak mekanik dengan lingkungan jika perumateri tekanan pada lingkungan menyebabkan perumateri tekanan dalam sistem. Sedangkan sistem dikatakan berkontak dengan lingkungan jika perumateri suhu pada lingkungan dapat menghasilkan suatu perumateri di sistem.

Sering sistem tersusun dari satu jenis materi, tapi dalam kasus-kasus lain mungkin tersusun atas beberapa materi yang kompleks. Dalam analisa termodinamika, pusat-pusat perhatian dapat berupa: keseluruhan proses, bagian dari proses, alat proses atau material yang terlibat dalam proses. Pengertian terakhir ini penting untuk lebih memahami tentang pengertian jenis sistem tertutup dan sistem terbuka.

Pada termodinamika, berdasarkan eksistensi material dan energi dalam kaitannya dengan interaksi antara sistem dan lingkungan, sistem dibagi menjadi 3 jenis, yaitu:

- **Sistem tertutup** (*closed system*), yaitu sistem dimana selama proses berlangsung tidak terdapat perpindahan material dari sistem ke lingkungan, atau sebaliknya, tetapi berlangsung perpindahan energi.

Contoh alat mekanik yang mewakili sistem jenis ini adalah:
silinder dilengkapi piston, reaktor batch.

- **Sistem terbuka** (*opened system* atau *flow processes*), yaitu sistem dimana selama proses berlangsung terdapat perpindahan baik material maupun energi dari sistem ke lingkungan, atau sebaliknya.

Contoh alat mekanik yang mewakili sistem jenis ini adalah: **kompresor, turbin, pompa, nozzle, blower dan expansion valve.**

- **Sistem terisolasi** (*isolated system*), yaitu sistem dimana selama proses berlangsung tidak terdapat perpindahan baik material maupun energi dari sistem ke lingkungan, atau sebaliknya.

Sistem termodinamika, dalam hal ini sistem dirujuk pada materi/materi kerja yang mengalami proses termodinamika, dapat teridentifikasi dalam berbagai kondisi. Informasi tentang deskripsi lengkap dari sistem diberikan oleh **sifat-sifat termodinamika** (*thermodynamic properties*). Atau dengan pernyataan lain, sifat termodinamika menentukan kondisi (*state*) dari sistem. Sifat termodinamika dari sistem adalah karakteristik eksternal sistem yang dapat diamati. Karakteristik eksternal ini dapat dimaknai sebagai sifat-sifat makroskopik dari zat/materi kerja yang dapat diukur menggunakan alat ukur yang ada. Dapat dirangkum bahwa **sifat-sifat termodinamika** dapat dibedakan berdasarkan dua cara pengelompokan, yaitu:

1. Pengelompokan berdasarkan dipengaruhi atau tidaknya nilai suatu sifat termodinamika oleh total massa atau total mole sistem, terdapat dua jenis sifat termodinamika, yaitu:

- a. **Sifat intensif**, yaitu: sifat termodinamika yang nilainya tidak tergantung pada total massa atau total mole sistem.
Contoh: tekanan, suhu dan densitas.
 - b. **Sifat ekstensif**, yaitu: sifat termodinamika yang nilainya tergantung pada total massa atau total mole sistem.
Contoh: volum, entalpi, panas dan kerja total.
2. Pengelompokan berdasarkan jenis besaran yang digunakan untuk menyatakan kuantitas sistem (total massa atau total mole) sebagai pembagi sifat ekstensif. Dalam hal ini sifat termodinamika yang dihasilkan, dikenal dengan istilah **sifat spesifik** (*specific properties*). **Sifat spesifik** pada dasarnya **merupakan sifat intensif**. Terdapat dua jenis sifat spesifik, yaitu:
- a. **Nilai spesifik** (*specific values*), yaitu: sifat termodinamika yang dihasilkan melalui pembagian sifat ekstensif dengan total massa sistem. Jika dinyatakan dengan bentuk rumusan, adalah sebagai berikut:

$$\text{Nilai spesifik} = \frac{\text{Sifat ekstensif}}{\text{Massa sistem}} \quad \dots(2.1)$$

Contoh:

- $\frac{\text{Volum}}{\text{massa}} = \text{volum spesifik} \Rightarrow \frac{V}{m} = v$
- $\frac{\text{Panas}}{\text{massa}} = \text{panas spesifik} \Rightarrow \frac{Q}{m} = q$

- $\frac{\text{Kapasitas panas}}{\text{massa}} = \text{kapasitas panas spesifik}$
 $\Rightarrow \frac{C}{m} = c$

b. **Nilai molar** (*molar values*), yaitu: sifat termodinamika yang dihasilkan melalui pembagian sifat ekstensif dengan mol sistem. Jika dinyatakan dengan bentuk rumusan, adalah sebagai berikut:

$$\text{Nilai molar} = \frac{\text{Sifat ekstensif}}{\text{mol sistem}} \quad \dots(2.2)$$

Contoh:

- $\frac{\text{Volum}}{\text{mol}} = \text{volum molar} \Rightarrow \frac{V}{n} = V_m$
- $\frac{\text{Panas}}{\text{mol}} = \text{panas molar} \Rightarrow \frac{Q}{n} = Q_m$
- $\frac{\text{Kapasitas panas}}{\text{mol}} = \text{kapasitas panas molar}$
 $\Rightarrow \frac{C}{n} = C_m$

B. Besaran Termodinamika dan Satuannya

Besaran termodinamika dapat diartikan sebagai istilah umum untuk menyatakan sifat termodinamika (*thermodynamic properties*) dari sistem. Pada sub bab ini dibahas beberapa besaran termodinamika penting yang sering dipakai, yaitu: suhu, tekanan dan gaya.

B.1. Suhu

Suhu sistem adalah suatu ukuran gerakan acak dari molekul-molekul sistem. Suhu sistem yang semakin tinggi, akan direspon dengan semakin acak dan cepatnya gerakan molekul-molekul sistem, dan demikian sebaliknya. Jika satu sistem memiliki suhu berbeda dibanding dengan sistem yang lain, maka akan terjadi kontak termal antar sistem-sistem tersebut. Hukum ke nol termodinamika menyatakan bahwa jika kontak termal antar sistem yang berbeda suhu tersebut terus berlangsung, maka pada saat tertentu akan tercapai kesetimbangan termal. Saat kesetimbangan termal tercapai, perumateri-perubahan yang terjadi pada beberapa sifat fisik dari sistem tidak teramati lagi, dan kontak termal terhenti.

Suhu umumnya diukur dengan cairan dalam termometer gelas, dimana cairan akan terexpansi ketika dipanasi. Termometer cair berupa pipa dengan ukuran seragam yang sebagian volumenya diisi cairan seperti merkuri, alkohol atau fluida lainnya. Derajat “kepanasan” (suhu) dari sistem yang diukur dengan termometer cair, dapat diketahui dengan mengukur/melihat panjang cairan di dalam pipa.

Skala umum dari suhu yang dikenal adalah suhu Fahrenheit dan Celsius (*centigrade*), dan didefinisikan dengan menggunakan titik es dan titik uap dari air pada tekanan atmosferik. Pada skala suhu Celsius, interval antara titik es dan titik uap dibagi ke dalam 100 bagian yang sama. Pendefinisian titik-titik untuk skala suhu Fahrenheit dan Celsius ditunjukkan pada Tabel 2.1. Sedangkan konversi antara suhu Fahrenheit dan Celsius adalah sebagai berikut:

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32) \quad \dots(2.3)$$

$$^{\circ}\text{F} = 1,8 (^{\circ}\text{C}) + 32 \quad \dots(2.4)$$

Tabel 2. 1 Pendefinisian titik-titik untuk skala suhu Fahrenheit dan Celsius

	$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{C}$	K	R
Titik uap air (<i>steam</i>) pada 1 atm	212	100	373,15	671,67
Titik es	32	0	273,15	491,67
Nol absolut	459,67	273,15	0	0

Berdasarkan skala suhu yang ditunjukkan pada Tabel 2.1, dapat dirumuskan hubungan antar skala suhu selain yang ditunjukkan pada Persamaan (2.3) dan (2.4), yaitu Kelvin (K) dan Rankine (R) sebagai berikut:

$$T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \quad \dots(2.5)$$

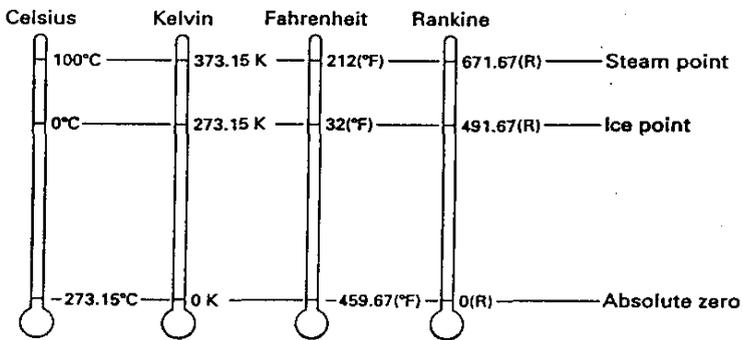
$$T(R) = T(^{\circ}\text{F}) + 459,67 \quad \dots(2.6)$$

$$T(R) = 1,8 T(K) \quad \dots(2.7)$$

$$T(R) = 1,8 (T(^{\circ}\text{C}) + 273,15) \quad \dots(2.8)$$

$$T(K) = \frac{1}{1,8} (T(^{\circ}\text{F}) + 459,67) \quad \dots(2.9)$$

Untuk lebih jelasnya, hubungan antara skala suhu Celsius, Kelvin, Fahrenheit dan Rankine ditunjukkan pada Gambar 2.1 berikut:



Gambar 2. 1 Hubungan antar skala suhu

B.2. Tekanan

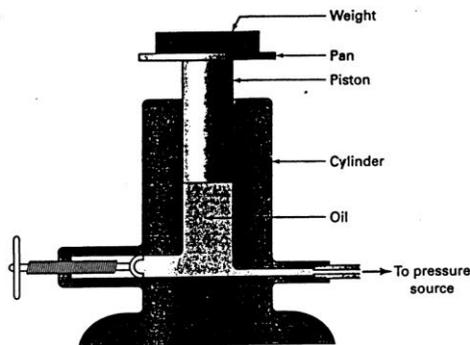
Tekanan, dengan simbol umum P, yang dilakukan oleh suatu materi (misalnya fluida) terhadap suatu permukaan didefinisikan sebagai gaya normal F_n yang dilakukan oleh materi per satuan luas permukaan A. Sehingga tekanan secara umum dirumuskan sebagai:

$$P = \frac{F_n}{A} \quad \dots(2.10)$$

Gaya normal sendiri merupakan gaya yang memiliki arah tegak lurus terhadap permukaan bidang tekan. Rumusan dari F_n tergantung pada jenis gaya yang bekerja pada permukaan bidang tekan dan arahnya. Untuk kasus pada alat ukur tekanan beban mati (*dead-weight gauge*) sebagai salah satu standar pokok dari pengukuran tekanan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, gaya yang dilakukan oleh beban dan piston terhadap fluida pada saat tercapai kesetimbangan mekanik, adalah berupa gaya gravitasi. Oleh karena itu dengan hukum Newton, Persamaan (2.10) menjadi:

$$P = \frac{F_n}{A} = \frac{1}{g_c} \cdot \frac{m \cdot g}{A} \quad \dots(2.11)$$

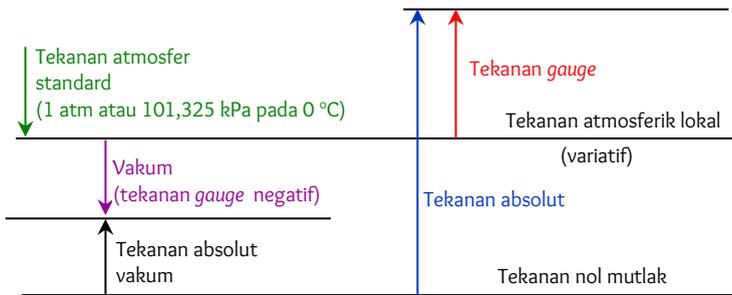
dengan g adalah percepatan gravitasi lokal, dan g_c adalah faktor proporsionalitas Newton.



Gambar 2. 2 *Dead-weight gauge*

Seperti yang telah disinggung di bagian sebelumnya bahwa alat ukur tekanan beban mati merupakan salah satu standar pokok dari pengukuran tekanan. Jenis standar pokok pengukuran tekanan yang lain adalah: manometer, barometer, mikromanometer dan McLeod *gauge*. Setiap alat ukur tekanan tersebut memiliki karakteristik tersendiri, baik dalam hal interval pengukuran maupun tingkat ketelitiannya. Misalkan manometer memiliki interval pengukuran antara 0,01 sampai 100 psig dengan akurasi pembacaan 0,02 sampai 0,2%, sedangkan barometer memiliki interval pengukuran antara 27 sampai 31 inHg dengan akurasi pembacaan 0,001 sampai 0,03%. Alat ukur tekanan beban mati memiliki interval pengukuran antara 0,01 sampai 10000 psig dengan akurasi pembacaan 0,01 sampai 0,05%.

Tekanan dapat dinyatakan dalam tiga bentuk, yaitu tekanan gauge, tekanan vakum dan tekanan absolut. Istilah tekanan gauge dipakai untuk mengukur tekanan di atas tekanan atmosferik lokal, sedangkan guna mengukur tekanan di bawah tekanan atmosferik, dipakai istilah tekanan vakum. Tekanan vacuum sering juga dikenal dengan istilah tekanan gauge negatif. Tekanan absolut sendiri merupakan tekanan yang mengkorelasikan antara tekanan gauge dan tekanan vakum dengan tekanan atmosferiknya. Ilustrasi hubungan dari ketiga jenis tekanan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut:



Gambar 2.3 Hubungan *gauge* dengan tekanan absolut

Berdasarkan ilustrasi berbagai jenis tekanan pada Gambar 2.3, selanjutnya dapat dituliskan rumusan yang menyatakan hubungan, baik antara tekanan absolut dengan tekanan *gauge*, maupun antara tekanan absolut dengan tekanan vakum, sebagai berikut:

$$P_{\text{absolut}} = P_{\text{atmosferik}} + P_{\text{gauge}} \quad \dots(2.12)$$

$$P_{\text{absolut vakum}} = P_{\text{atmosferik}} - P_{\text{gauge negatif}} \quad \dots(2.13)$$

Satuan dari tekanan merujuk pada ketiga jenis tekanan ini, misalkan dalam sistem satuan English Engineering, satuan tekanan dinyatakan *pound force per square inch* (psi) atau *pound force per square foot* (psf), dimana keduanya mungkin dinyatakan dalam psig, psia atau psi vakum (demikian juga untuk psf: psfg, psfa atau psf vakum). Namun perlu dicatat bahwa pada sistem satuan SI (Satuan Internasional), tidak digunakan istilah *gauge* ataupun vakum. Pada SI, semua tekanan adalah tekanan absolut. Satuan tekanan dalam sistem satuan SI adalah N/m^2 atau juga dikenal sebagai pascal (Pa).

Dalam perhitungan-perhitungan termodinamika, harus memakai tekanan absolut. Beberapa satuan dari tekanan lainnya adalah:

- **atm**, 1 atm merupakan nilai pendekatan dari tekanan rata-rata yang dilakukan oleh atmosfer bumi terhadap permukaan laut dimana $1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa}$
- **bar**, 1 bar setara dengan 100 kPa
- **torr**, $1 \text{ torr} = 1 \text{ mmHg}$ diukur pada $0 \text{ }^\circ\text{C}$ di daerah gravitasi standar, yang nilainya sama dengan 133,322 Pa
- **cmHg**, **mmHg**, **inHg**, dan sejenisnya (hasil pengukuran tekanan tergantung pada nilai gravitasi lokal dan suhu pengukuran).

B.3. Gaya

Satuan gaya dalam sistem satuan SI adalah newton (dengan simbol N). Pengertian dari gaya dapat diturunkan dari hukum kedua Newton tentang gerak, yang menyatakan bahwa gaya (F) merupakan produk perkalian antara massa (m) dengan percepatan (a).

$$F = m \cdot a \quad \dots(3.14)$$

1 N didefinisikan sebagai gaya yang bekerja ketika digunakan materi bermassa 1 kg sehingga materi akan bergerak dengan percepatan 1 m/s^2 .

Dalam sistem satuan English engineering, satu pound gaya (lb_f) didefinisikan sebagai gaya yang memberikan percepatan kepada materi bermassa 1 pound massa (lb_m) sebesar $32,174 \text{ ft/s}^2$.

Rumusan Hukum II Newton tentang gerak dengan memasukkan konstanta proporsionalitas Newton (untuk konsistensi satuan), akan menjadi sebagai berikut:

$$F = \frac{1}{g_c} m \cdot a \quad \dots(2.15)$$

Nilai g_c tergantung pada sistem satuan yang digunakan atau kombinasi satuan dari panjang, waktu, massa dan gaya yang dipakai. Tabel 2.2 merangkum nilai g_c untuk beberapa kombinasi satuan dari besaran-besaran termodinamika dimaksud. Sedangkan tentang berat (*weight*), berat merupakan gaya gravitasi yang bekerja pada suatu materi, sehingga berat (*weight*, w) berbeda dengan massa (*mass*, m). Hubungan antara berat dan massa adalah:

$$w = \frac{1}{g_c} m \cdot g \quad \dots(2.16)$$

Oleh karena gaya dan massa berbeda konsep, maka pound gaya (lb_f) dan pound massa (lb_m) maupun kilogram gaya (kg_f) dan kilogram massa (kg_m), memiliki kuantitas yang berbeda, dan dalam penulisannya harus dituliskan lengkap, sebagai gaya ataukah massa. Jika dalam satu persamaan, keduanya muncul (lb_f dan lb_m , atau kg_f dan kg_m), maka g_c harus muncul dalam persamaan tersebut untuk membuat persamaan tersebut benar secara dimensi.

Tabel 2. 2 Nilai g_c dengan beberapa kombinasi satuan

Panjang	Waktu	Massa	Gaya	g_c	Sistem satuan
ft	s	lb _m	lb _f	32,174 lb _m ft/(lb _f s ²)	English engineering
ft	h	lb _m	lb _f	4,17·10 ⁸ lb _m ft/(lb _f h ²)	English engineering
ft	s	slug	lb _f	1,0 slug ft/(lb _f s ²)	English gravitational
cm	s	g	dyne	1,0 g cm/(dyne s ²)	c g s
m	s	kg	N	1,0 kg m/(N s ²)	SI
m	s	kg	kg _f	9,81 kg m/(kg _f s ²)	MKS / metrik

Besaran termodinamika lainnya yang juga sering dipakai adalah massa, mole, panjang, waktu, kecepatan, volum total dan konsentrasi. Untuk selanjutnya, akan ditinjau secara ringkas beberapa besaran termodinamika saja, yaitu massa, mol, volum total dan konsentrasi.

- Massa (m)

- Definisi: ukuran kuantitas materi yang dikandung oleh suatu materi.

- Standar massa: 1 kg setara dengan massa silinder yang terbuat dari campuran Pt–Ir yang disimpan di Biro Internasional untuk Ukuran dan Berat di Sevres, dekat Paris, Perancis.

- Satuan: kg, ton (SI); kg mass/ kgm (MKS atau metrik); gram (cgs); pound mass/ lbm (English absolute dan English engineering); slug (English gravitational) dan sebagainya.
- Mol (n)
 - Definisi: ukuran kuantitas materi yang dikandung oleh suatu materi, yang jumlahnya setara dengan $6,02 \cdot 10^{24}$ partikel (atom, ion, atau molekul).
 - Satuan: gmol, kmol (SI); lb_{mol} (English) dan sebagainya
 - Hubungan antara massa (m) dengan mol (n) adalah:

$$m = n M, \text{ atau: } n = \frac{m}{M} \quad \dots(3.17)$$

dengan M adalah massa molar (massa per mol) dari materi.

- Volume (V)
 - Definisi: isi dari materi atau sistem 3 dimensi
 - Ekspresi matematik atau rumusan volume bergantung pada bentuk materinya (rektangular, silinder, *spherical*, *conical* atau bentuk-bentuk materi lainnya).
 - Contoh: a. Silinder dengan diameter dalam D_i dan tinggi H,

volumenya dirumuskan dengan
$$V = \frac{\pi}{4} D_i^2 H$$

- b. Bola dengan jari-jari R, volumenya dirumuskan

dengan
$$V = \frac{4}{3} \pi R^3$$

- Satuan: m^3 , liter (= dm^3), cm^3 (= cc, mL), ft^3 (= cuft), galon dan sebagainya.
- **Konsentrasi**
 - Definisi dasar: jumlah/kuantitas suatu materi dalam tiap satu satuan volume total dari campurannya.
 - Contoh: a. **Konsentrasi massa** adalah rasio antara massa materi terhadap volume total. Oleh karena itu konsentrasi massa lebih sering dikenal dengan istilah densitas (ρ), dan dirumuskan dengan
$$\rho = \frac{m}{V}$$
. Sedangkan se per densitas, disebut sebagai volume spesifik, $v = 1/\rho$. Densitas suatu materi sering juga diwakili oleh besaran *specific gravity* (s.g), yang didefinisikan sebagai rasio antara densitas suatu materi terhadap densitas air pada suhu 4 °C sebagai standar. Dalam sistem satuan cgs, densitas air pada 4 °C adalah sebesar 1 g/cm^3 .
 - b. **Konsentrasi molar** adalah rasio antara mol materi terhadap volum total campurannya, atau sering dinyatakan sebagai molaritas, [C], dirumuskan dengan
$$[C] = \frac{n}{V}$$
. Se per molaritas atau rasio antara volum total terhadap mol

materi, dikenal sebagai volume molar (V_m), atau

$$V_m = \frac{V}{n} = \frac{1}{[C]}.$$

c. Jenis konsentrasi yang lain misalnya: normalitas, molalitas, fraksi mol, fraksi massa, %massa, ppm, ppb, dan sebagainya.

- Satuan: kg/m^3 , kg/liter , lbm/ft^3 , dan sebagainya (konsentrasi massa); mol/liter , kmol/m^3 , $\text{lb}_{\text{mol}}/\text{ft}^3$, dan sebagainya (konsentrasi molar).

C. Satuan dengan “prefik/awalan multiple”

Satuan yang dituliskan dengan prefik atau awalan multiple lebih dikenal dalam sistem SI (Satuan Internasional). Prefik menjadi bagian dari nama atau simbol satuan yang penulisannya digabungkan, misalnya: megapascal (simbol: MPa), kilojoule (simbol: kJ), mikrometer (simbol: μm), dan sebagainya.

Multiple dari satuan tersebut merupakan bilangan sepuluh berpangkat, atau sering dinyatakan dengan istilah faktor 10. Penggunaan satuan-satuan multiple direferensikan terhadap satuan tunggalnya. Sebagai contoh, satuan multiple kPa, MPa, GPa dan seterusnya, direferensikan terhadap satuan tunggal dari gaya, yaitu Pa (N/m^2). Rangkuman dari multiple faktor 10 dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut:

Tabel 2. 3 Multiple faktor 10 pada sistem satuan SI

Prefik	Atto	femto	pico	nano	mikro	milli	centi	deci
Simbol	a	f	p	n	μ	m	c	d
Multiple	10^{-18}	10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}

Prefik	deca	hecto	kilo	mega	giga	tera	mega
Simbol	da	h	k	M	G	T	M
Multiple	10^1	10^2	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^6

D. Fungsi Termodinamika

Pada evaluasi kasus-kasus termodinamika, pengevaluasian dilakukan berdasarkan atas nilai-nilai dari sifat/besaran termodinamika dari sistem antara sebelum dan sesudah sistem mengalami perumateri akibat dikenai suatu proses termodinamika. Untuk membedakan bahwa kuantitas perumateri suatu sifat termodinamika dipengaruhi atau tidak oleh jalannya proses termodinamika yang dilalui dari kondisi awal sampai dicapai kondisi akhir, diperkenalkan suatu istilah yang dikenal sebagai fungsi termodinamika. Ada 2 jenis fungsi termodinamika, yaitu:

1. Fungsi keadaan

Sifat-sifat atau besaran termodinamika yang termasuk dalam fungsi keadaan, kuantitas perumaterinya hanya ditentukan oleh nilai sifat termodinamika itu pada kondisi awal dan akhir saja, dan tidak dipengaruhi oleh jalannya proses termodinamika untuk mencapai kondisi akhir dari kondisi

awalnya. Perumateri yang sangat kecil pada sifat termodinamika yang merupakan fungsi keadaan, ditandai dengan simbol “d”. Sifat termodinamika yang termasuk dalam fungsi keadaan, misalnya adalah: tekanan, suhu, posisi, volum spesifik, entalpi, energi dalam dan entropi.

Salah satu ciri dari fungsi keadaan adalah bahwa hasil integral dari perumateri sifat termodinamika yang mengalami siklus, adalah sama dengan nol. Atau jika dinyatakan dalam bentuk persamaan adalah sebagai berikut:

$$\oint d(tp) = 0$$

dengan “tp” adalah suatu *thermodynamic property* fungsi keadaan.

2. Fungsi non-keadaan

Sifat-sifat atau besaran termodinamika yang termasuk dalam fungsi non-keadaan, kuantitas perumaterinya dipengaruhi/ditentukan oleh jalannya proses termodinamika yang dialami oleh sistem untuk mencapai kondisi akhir dari kondisi awalnya. Perumateri yang sangat kecil pada sifat termodinamika yang merupakan fungsi non-keadaan, ditandai dengan simbol “ δ ”. Sifat termodinamika yang termasuk dalam fungsi keadaan adalah panas dan kerja.

Ciri dari fungsi non-keadaan adalah bahwa hasil integral dari perumateri sifat termodinamika yang mengalami siklus, adalah tidak sama dengan nol. Atau jika dinyatakan dalam bentuk persamaan adalah sebagai berikut:

$$\oint \delta (tp) \neq 0$$

dengan “tp” adalah suatu *thermodynamic property* fungsi non-keadaan.

Evaluasi Bab 2

(Soal-Penyelesaian dan Soal Latihan)

A. Soal dan Penyelesaian

1.A Fahrenheit and a Celsius thermometer are used to measure the temperature of a fluid. If the Fahrenheit reading is 1.5 times that of the Celsius reading, what are both reading?

Penyelesaian: (answer: - 160 °F, - 106.7 °C)

Hubungan antara suhu Fahrenheit dengan suhu Celcius diberikan pada Persamaan (2.4):

Misalkan skala pembacaan pada termometer Celcius = x °C.

Dari soal dapat diketahui bahwa skala pembacaan pada thermometer Fahrenheit = $1,5x$ °F.

Jika nilai skala pada tiap termometer tersebut disubstitusikan ke Persamaan (2.4), diperoleh persamaan:

$$1,5x = 1,8x + 32$$

sehingga selanjutnya dapat diselesaikan dengan mudah, akan diperoleh:

$$x = -106,67 \text{ C}$$

(Hasil ini adalah pembacaan skala pada termometer Celcius)

Sedangkan untuk pembacaan pada skala Fahrenheit = $1,5x$ sehingga diperoleh nilai pembacaan (-160 °F).

2.A mass of 100 kg weighs 980.6 N at sea level. Estimate the weight of this body at the top of a mountain 5 km high! Assume that the mean diameter of the earth is 12,742 km.

Penyelesaian: (answer: 979.06 N)

Konsep dasar:

Berat dari suatu benda merupakan gaya tarik gravitasi pusat massa dimana benda tersebut masih terpengaruh medan gravitasi, yang bekerja pada benda tersebut

Jika dua materi (benda 1 bermassa m_1 dan benda 2 bermassa m_2) antar titik pusat massanya berada pada jarak sejauh R , maka kedua benda tersebut akan mengalami gaya tarik-

menarik (gaya atraksi Newton) yang besarnya dirumuskan sebagai:
dengan: k adalah tetapan proporsionalitas; m_1 adalah massa benda
penguji (medan gravitasi lebih kuat, misalkan bumi); m_2 adalah massa
benda yang diuji

Dari Persamaan (i) tersebut, semakin jauh jarak antar pusat massa dua
materi yang berinteraksi, maka pengaruh gaya tarik-menariknya
semakin lemah, atau dengan kata lain bahwa berat benda yang diuji
semakin ringan.

Dengan memanfaatkan ketiga konsep tersebut, penyelesaian
selanjutnya adalah sebagai berikut:

Misalkan ketinggian di permukaan laut adalah A , sedangkan di puncak
pegunungan adalah B , dan massa bumi adalah m_1 .

Dari soal diketahui bahwa:

Massa benda uji, $m_2 = 100 \text{ kg}$

Berat benda uji di A , $F_A = 980,6 \text{ N}$

Radius bumi ($= \frac{1}{2}$ diameter bumi) = 6371 km

Ketinggian puncak gunung dari permukaan air laut = 5 km .

Diperoleh jarak interaksi di A , $R_A = 6371 + 0 = 6371 \text{ km}$

Jarak interaksi di B , $R_B = 6371 + 5 = 6376 \text{ km}$

Gaya atraksi di A ,

Gaya atraksi di B , ... (iii)

Dengan membagi Persamaan (iii) dengan Persamaan (ii), diperoleh:

Jadi berat benda bermassa 100 kg tersebut di puncak gunung dengan
tinggi 5 km dari permukaan laut, adalah $979,06 \text{ N}$.

B. Soal Latihan

1. Uap air sebanyak 1,2 kg pada suatu kondisi memiliki nilai volum spesifik sebesar $86,04 \text{ cm}^3/\text{g}$. Berapa volume (dalam liter) dan volum spesifik molar (dalam cuft/lbmol) uap air pada kondisi tersebut?

(Jawaban: $V_{\text{uap air}} = 103,25 \text{ liter}$, $v_{\text{uap air}} = 24,81 \text{ ft}^3/\text{lbmol}$)

2. Tekanan sekitar 3000 bar diukur dengan alat ukur tekanan beban mati (*a dead-weight gauge*). Diameter piston adalah 4 mm. Berapa kira-kira massa (dalam kg) beban yang dibutuhkan?

(Jawaban: $m_{\text{beban}} = 376,80 \text{ kg}$)

3. Pembacaan pada manometer merkuri pada suhu $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (yang salah satu ujungnya terbuka terhadap atmosfer) adalah 56,38 cm. Percepatan gravitasi lokal adalah $9,832 \text{ m/s}^2$. Tekanan atmosferik adalah 10,78 kPa. Berapa tekanan absolut (dalam kPa) yang terukur? Densitas merkuri pada $25 \text{ }^\circ\text{C}$ adalah $13,534 \text{ g/cm}^3$.

(Jawaban: $P_{\text{abs}} = 85,83 \text{ kPa}$)

4. Suatu gas diisikan ke dalam silinder berdiameter 1,25 ft yang dilengkapi sebuah piston, dan di atasnya terdapat beban diam. Massa piston dan beban sebesar 250 lb_m . Percepatan gravitasi lokal adalah $32,169 \text{ ft s}^{-2}$, dan tekanan atmosferik adalah 30,12 inHg.

- Berapa gaya (dalam lb_f) yang diberikan terhadap gas oleh atmosfer, piston dan beban, asumsikan tidak ada gesekan antara piston dan silinder?
- Berapa tekanan dari gas (dalam psia)?

(Jawaban: a. $F_{\text{gas}} = 2863,59 \text{ lb}_f$; b. $P_{\text{gas}} = 16,21 \text{ psia}$)

5. Satu mol udara dengan kondisi awal pada $100 \text{ }^\circ\text{C}$ dan 8 bar, mengalami perubahan-perubahan mekanik reversibel di dalam sistem tertutup. Udara diekspansikan secara isothermal (pada suhu tetap) sehingga dicapai suatu tekanan dimana ketika udara didinginkan pada volum konstan sampai suhunya menjadi $50 \text{ }^\circ\text{C}$, tekanannya sebesar 3 bar. Dari kondisi terakhir ini, udara dikompresi secara adiabatik sehingga kondisi udara kembali ke

kondisi awal (100 °C dan 8 bar). Berapa perubahan entalpi dan energi dalam dari udara akibat perlakuan mekanik tersebut?

(Jawaban: Perubahan entalpi dan perubahan energi dalam = nol, keduanya adalah besaran fungsi keadaan, dan perubahan yang terjadi berupa siklus)

6. Pada suhu 600 °F dan tekanan 370 psia, uap air dalam kondisi lewat panas (*superheated vapor*). Pada kondisi tersebut volum spesifik dari uap air adalah $1,605 \text{ ft}^3 \text{ lb}_m^{-1}$. Massa uap air diketahui sebesar $0,458 \text{ lb}_m$. Berapa volum spesifik molar dan volum minimal bejana yang dibutuhkan untuk menampung uap air tersebut? Terhadap nilai volum spesifik molar, apa yang dapat disimpulkan terkait dengan jumlah uap air?

(Jawaban: $V_{m, \text{uap air}} = 28,89 \text{ ft}^3 \text{ lbmol}^{-1}$; $V_{\text{min}} = 0,74 \text{ ft}^3$; Nilai volum spesifik molar tidak dipengaruhi oleh jumlah uap air, volum spesifik molar merupakan besaran intrinsik)

7. Air dengan debit $0,5 \text{ liter menit}^{-1}$ dialirkan di dalam sebuah pipa silinder berdiameter dalam $1 \frac{1}{2}$ ". Densitas air diketahui sebesar $1013,7 \text{ kg m}^{-3}$. Sedangkan percepatan gravitasi lokal $9,91 \text{ m s}^{-2}$. Pipa tersebut dalam posisi miring dengan kemiringan 30° terhadap bidang horisontal. Untuk mengukur penurunan tekanan (*pressure drop*) pada pengaliran sepanjang 1 meter, dipasang manometer U pada bagian pipa yang telah disiapkan. Manometer tersebut menggunakan air raksa sebagai cairan kerjanya (densitas air raksa $13,6 \text{ kg liter}^{-1}$). Beda tinggi permukaan air raksa pada kedua kaki manometer ternyata sebesar 5,2 cm. Berapa *pressure drop* pada pengaliran sepanjang 1 meter tersebut?

(Jawaban: $(-\Delta P) = 11,51 \text{ kPa m}^{-1}$)

III. BENTUK-BENTUK ENERGI

A. Tinjauan Umum Energi

Energi dapat didefinisikan sebagai kapasitas atau kemampuan untuk melakukan kerja. Satu bentuk energi dapat diubah menjadi bentuk energi yang lain. Oleh karena itu, satuan dari semua bentuk energi (panas, kerja, energi listrik, energi potensial, energi listrik, energi inti dan energi dalam bentuk yang lain) adalah identik.

Bentuk-bentuk energi yang beragam dapat dikelompokkan setidaknya berdasarkan dua sudut pandang berikut:

1. Berdasarkan sumber pembangkitnya, ada beragam jenis energi, antara lain:
 - a. Energi potensial gravitasi (sumber: materi memiliki beda elevasi terhadap bidang referensi, dan berada pada pengaruh gaya tarik pusat massa)
 - b. Energi kinetik (sumber: materi bergerak dengan laju tertentu)
 - c. Energi nuklir (sumber: reaksi inti unsur radioaktif, reaksi fisi atau fusi)
 - d. Energi kimia (sumber: energi yang menyertai suatu reaksi kimia)
 - e. Energi angin, energi listrik, energi matahari, dan lain sebagainya.

2. Berdasarkan eksistensi, keberadaan, atau interaksi antara sistem dengan lingkungan (dalam pengertian termodinamika), dikenal ada 2 jenis energi, yaitu:

a. **Energi bersama atau tersimpan dalam materi**

Bentuk-bentuk energi yang termasuk ke dalam kelompok energi jenis ini adalah:

- Energi dalam (*internal energy*), U
Energi yang dimiliki oleh materi, yang timbul akibat adanya gerakan-gerakan pada tingkat mikroskopik (molekuler), baik gerak translasi, rotasi maupun vibrasi. Nilai mutlak energi dalam dari suatu materi tidak dapat ditentukan. Hanya nilai perumaterinya yang dapat ditentukan (ΔU).
- Energi tekan atau energi bentuk PV (P = tekanan dan V = volume, atau dapat juga sebagai volume spesifik, atau volume molar). Energi PV ditinjau ketika materi sedang dalam keadaan bergerak secara tinjauan makroskopis.
- Entalpi, H
Entalpi merupakan bentuk energi turunan dari energi dalam dan energi bentuk PV. Hubungan antar H , U dan PV secara matematis dinyatakan sebagai berikut:

$$H = U + PV \quad \dots(3.1)$$

Atau jika dinyatakan dalam bentuk diferensial:

$$dH = dU + dPV \quad \text{atau} \quad dH = dU + PdV + VdP \quad \dots(3.2)$$

Seperti halnya energi dalam, nilai mutlak entalpi dari suatu materi tidak dapat ditentukan. Hanya nilai perumaterinya yang dapat ditentukan (ΔH).

- Energi potensial gravitasi (E_p): Energi bersama materi yang timbul sebagai akibat materi berada pada elevasi atau ketinggian tertentu terhadap bidang referensi.
- Energi kinetik (E_k): Energi bersama materi yang timbul sebagai akibat materi bergerak dengan kecepatan tertentu.

b. Energi melewati bidang batas antar sistem dengan lingkungan

Termasuk ke dalam kelompok energi jenis ini adalah panas (Q) dan kerja (W).

- Panas, Q

Panas umumnya akan menyertai proses termodinamika yang dialami oleh sistem, kecuali jika sistem mengalami proses termodinamika berupa adiabatik reversibel. Panas yang terlibat akan berpindah dengan cara menembus pembatas antar sistem dengan lingkungan, dengan arah perpindahan mungkin dari sistem ke lingkungan atau sebaliknya. Pembatas dalam pengertian ini, umumnya merujuk pada pembatas riil, bukan pembatas imajiner.

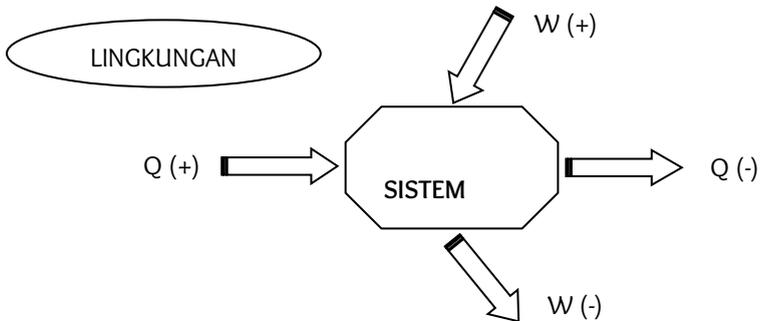
Jenis panas: panas sensibel (perumateri suhu), panas laten (perumateri fase), panas reaksi, panas pelarutan, dan lain sebagainya.

- Kerja, W

Kerja dalam hal ini dapat dimaknai sebagai kerja yang diterima oleh sistem akibat suplai kerja mekanik dari alat-alat penghasil kerja (misal: pompa, kompresor dan piston), atau kerja yang mampu dihasilkan oleh sistem yang kemudian dikonversi menjadi kerja mekanik oleh alat-alat penghasil kerja (misal: turbin dan piston).

Pada pembagian bentuk-bentuk energi tersebut, catatan tammateri perlu diberikan pada bentuk-bentuk energi yang terkelompok ke dalam energi yang lewat bidang batas. Karena arah perpindahan energi lewat pembatas dapat berlangsung dari “sistem” menuju “lingkungan” atau sebaliknya, maka perlu ditentukan pembedaan penandaan terhadap Q dan W terkait dengan arah perpindahannya.

Untuk keperluan membedakan arah perpindahan dari panas dan kerja ini, buku-buku literatur tentang Termodinamika sekarang, pada umumnya memberikan tanda positif (+) jika panas (Q) dan kerja (W) berpindah melewati pembatas dari “lingkungan” ke “sistem”, dan tanda negatif (-) jika sebaliknya. Arah panas dan kerja serta penandaan keduanya, secara lebih jelas ditampilkan pada Gambar 3.1 berikut:



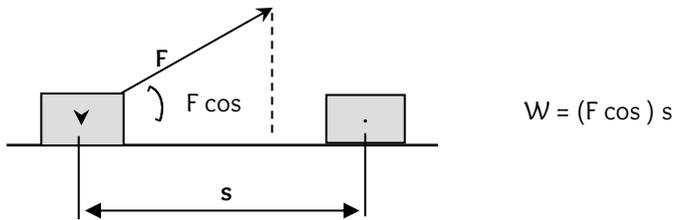
Gambar 3. 1 Ketentuan penandaan Q dan W terkait dengan arah perpindahannya

B. Kerja

Kerja yang dilakukan oleh suatu gaya adalah merupakan hasil perkalian antara jarak perpindahan yang dialami materi dengan komponen gaya yang searah dengan perpindahan. Oleh karena itu, per definisi, kuantitas kerja dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\delta W = F ds \quad \dots(3.3)$$

dimana F merupakan komponen gaya yang bekerja sepanjang jarak perpindahan ds. Sebagai penekanan kembali bahwa F yang digunakan dalam perhitungan kerja adalah komponen gaya yang searah dengan perpindahan materi. Untuk lebih jelasnya, diberikan satu ilustrasi perhitungan kerja pada kasus berikut:



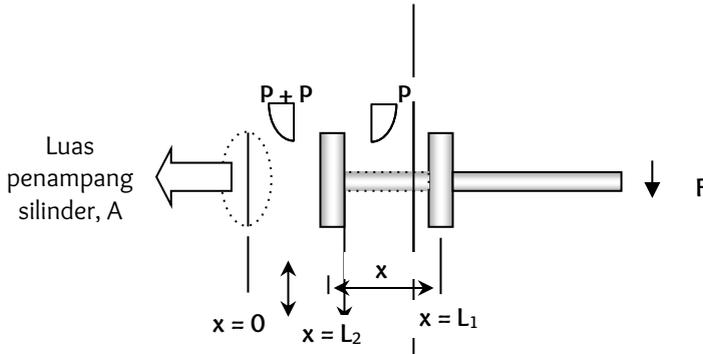
Gambar 3. 2 Ilustrasi kasus perhitungan kerja

Dalam kasus-kasus termodinamika, kuantitas dari kerja yang terlibat sangat ditentukan oleh jenis proses termodinamika yang dialami oleh sistem (sistem dalam hal ini adalah materi/fluida kerja), jenis sistem termodinamika, dan jenis fluida kerja yang digunakan. Pengertian ini memberi arahan bahwa salah satu cara untuk menghitung kerja yang terlibat adalah dengan menerapkan rumusan Hukum I Termodinamika tentang konservasi energi.

Cara lain dalam mengevaluasi kerja adalah dengan menggunakan rumusan kerja secara langsung. Dalam penggunaannya, cara ini memerlukan informasi tentang jenis fluida kerja yang digunakan, apakah gas ideal, gas nyata atau fluida berupa cairan, dan jenis sistem yang digunakan, apakah sistem tertutup atau sistem terbuka. Berikut akan diuraikan cara untuk menentukan rumusan kerja pada sistem tertutup dan sistem terbuka. Sebagai catatan, bahwa kerja yang ditentukan dengan cara ini adalah merupakan kerja reversibel (W_{rev}).

B.1. Rumusan kerja pada sistem tertutup

Alat mekanik yang merepresentasikan sistem tertutup misalnya adalah silinder yang dilengkapi dengan piston. Oleh karena itu penguraian rumusan kerja pada sistem tertutup dilakukan dengan meninjau satu kasus proses perumateri terhadap fluida kerja di dalam alat tersebut. Misalkan ditinjau kasus dimana fluida kerja mengalami proses kompresi reversibel, sehingga volum akhir dari sistem menjadi lebih kecil dibanding volum awalnya. Perumateri volum dari sistem ini direpresentasikan dengan berubahnya posisi piston terhadap dasar silinder. Ilustrasi proses kompresi tersebut ditampilkan pada Gambar 3.3 berikut:



Gambar 3. 3 Kompresi dalam silinder berpiston

Berdasarkan Persamaan (2.10), diperoleh: $F = P A$. Jika persamaan ini disubstitusikan ke Persamaan (3.3) akan diperoleh:

$$\delta W = -PA(dx)$$

Tanda negatif (-) dimunculkan dengan maksud untuk menyesuaikan penandaan pada kerja terkait dengan arah perpindahannya (dari lingkungan ke sistem, atau sebaliknya).

Nampak dari Gambar 3.3 bahwa nilai dari P (tekanan) berubah, sedangkan nilai A (luas penampang silinder) adalah tetap, sehingga persamaan terakhir dapat dituliskan menjadi:

$$\delta W = -PA(dx); \text{ dimana } d(Ax) = dV$$

sehingga akan diperoleh:

$\delta W = -P dV$, persamaan ini jika diintegrasikan akan diperoleh:

$$W = -\int_1^2 P dV \quad \dots(3.4)$$

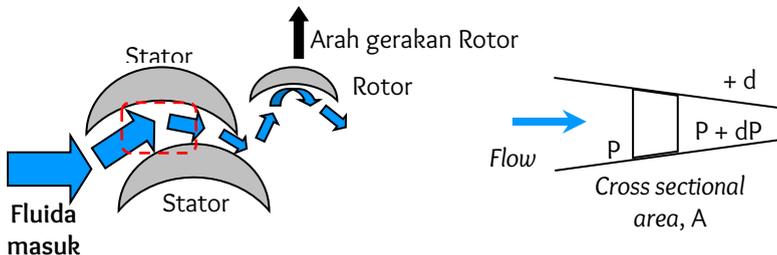
dengan V adalah volume total dari sistem. Untuk keperluan memperoleh nilai kerja spesifik (w) atau kerja molar (W_m), jenis parameter volume disesuaikan menjadi volume spesifik (v) atau volume molar (V_m).

B.2. Rumusan kerja pada sistem terbuka (proses alir)

Contoh fenomena yang merepresentasikan kasus pada sistem terbuka yang relatif sederhana untuk menguraikan rumusan kerja pada sistem terbuka adalah aliran fluida melalui sebuah nozzle. Salah satu aplikasi penggunaan nozzle, misalnya adalah penggunaannya pada sebuah turbin. Keberadaan nozzle dalam turbin, atau alat-alat mekanik lain (seperti pada pompa dan ejektor), berfungsi untuk mengubah energi kinetik yang terkandung dalam fluida kerja menjadi energi tekan, sehingga pada ujung keluaran

(*discharge*) nozzle, tekanan fluida mengalami peningkatan secara signifikan.

Rumusan kerja pada kasus aliran fluida dalam nozzle tersebut diturunkan dengan memanfaatkan hukum-hukum mekanik yang diterapkan terhadap *element volume* dari sistem. Ilustrasi aliran fluida melalui nozzle pada turbin, pengambilan *element volume* dan sifat-sifat termodinamika yang terlibat, ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 3. 4 Aliran fluida dalam *nozzle* dan pengambilan *element volume* (dalam kotak putus-putus merah, *element volume* di sebelah kanan)

Dari Gambar 3.4 di atas, penurunan rumusan kerja reversibel pada sistem terbuka dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Gaya netto pada elemen fluida dihitung dengan rumusan:

Gaya netto = gaya masuk ke *element volume* – gaya keluar dari *element volume*

Sehingga jika dinyatakan dalam bentuk persamaan menjadi:

$$\text{Gaya netto} = (A \cdot P) - \{A \cdot (P + dP)\}$$

Selanjutnya diperoleh:

$$\text{Gaya netto} = -A \, dP \quad \dots(3.5a)$$

- Adanya perumateri gaya akan menimbulkan perumateri laju momentum.

Momentum = (massa) x (kecepatan),

dan jika kedua ruas dibagi dengan waktu, diperoleh persamaan berikut:

$$\frac{\text{Momentum}}{\text{Waktu}} = \text{laju momentum} = \frac{\text{massa}}{\text{waktu}} \times \text{kecepatan}$$

dengan massa per waktu adalah laju massa yang disimbolkan dengan \dot{m} .

Rumusan laju momentum menjadi:

$$\text{Laju momentum} = \dot{m} \times v$$

$d(\text{laju momentum}) = \text{laju momentum keluar } element \text{ volume} - \text{laju masuk } element \text{ volume}$

sehingga, $d(\text{laju momentum}) = \{\dot{m} \cdot (v + dv)\} - (\dot{m} \cdot v)$

Diperoleh:

$$d(\text{laju momentum}) = \dot{m} \cdot dv \quad \dots(3.5b)$$

Sedangkan laju massa dirumuskan sebagai:

$$\dot{m} = \rho(A \cdot v) \quad \text{atau:} \quad \dot{m} = \frac{1}{v}(A \cdot v) \quad \dots(3.5c)$$

Dengan ρ adalah densitas, dan v adalah volume spesifik.

Substitusi Persamaan (3.5c) ke Persamaan (3.5b), diperoleh:

$$d(\text{laju momentum}) = \frac{A v}{v} \cdot dv \quad \dots(3.5d)$$

- Berdasarkan hukum-hukum mekanik, gaya netto yang terdapat pada elemen fluida harus sama dengan perumateri laju momentumnya. Oleh karena itu, kuantitas Persamaan (3.5a) adalah sama dengan kuantitas Persamaan (3.5d), atau:

$$-A dP = \frac{A v}{v} \cdot dv \quad \text{atau} \quad -v dP = v \cdot dv$$

Jika kedua ruas pada persamaan terakhir dikalikan dengan \dot{m} , diperoleh: $-\dot{m} v dP = \dot{m} v \cdot dv$

Integral persamaan tersebut pada batas “titik masukan/input, 1” sampai “titik keluaran/output, 2” diperoleh:

$$-\int_1^2 \dot{m} v dP = \left[\frac{1}{2} \dot{m} v^2 \right]_{\text{output}} - \left[\frac{1}{2} \dot{m} v^2 \right]_{\text{input}} = \dot{E}_{K,\text{out}} - \dot{E}_{K,\text{in}}$$

dengan $\dot{m} v = \dot{V}$ adalah debit atau laju volumetrik. Sehingga persamaan terakhir dapat dituliskan menjadi:

$$-\int_1^2 \dot{V} dP = \dot{E}_{K,\text{out}} - \dot{E}_{K,\text{in}} \quad \dots(3.5e)$$

Pada Persamaan (3.5e), energi dinyatakan dalam bentuk aliran/laju energi. Jika energi tidak dispesifikasikan per satuan waktu, Persamaan (3.5e) akan menjadi:

$$-\int_1^2 V dP = E_{K,out} - E_{K,in} \quad \dots(3.5f)$$

Persamaan (3.5f) memberikan informasi bahwa pada aliran fluida melalui satu buah nozzle yang ditinjau pada turbin, berlaku hubungan: untuk turbin yang bergerak tanpa gesekan (proses reversibel), peningkatan energi kinetik dari fluida akibat mengalir melalui nozzle adalah sama dengan kerja poros (*shaft work*) yang dihasilkan oleh bagian turbin yang ditinjau.

- Akhirnya dapat disimpulkan bahwa ekspresi matematik di ruas kiri dari Persamaan (3.5f) adalah merupakan rumusan kerja reversibel untuk sistem terbuka, dan dengan mempertimbangkan konvensi penandaan pada kerja (W) terkait dengan arah perpindahannya, rumusan kerja reversibel untuk sistem terbuka adalah:

$$W = +\int_1^2 V dP \quad \dots(3.5)$$

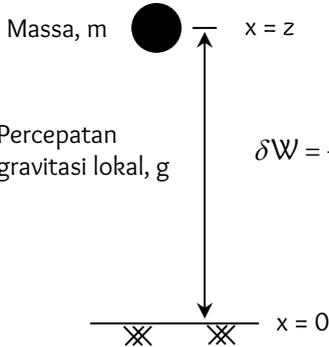
C. Energi Potensial Gravitasi dan Energi Kinetik

Energi potensial gravitasi dan energi kinetik sebagai bentuk energi yang terkelompok ke dalam energi yang terbawa aliran massa, merupakan bentuk energi yang kuantitasnya sudah tertentu (*fixed*) tergantung pada kondisi instalasi alat yang digunakan. Alat yang diinstalasi dengan beda elevasi (Δz) dan menggunakan saluran dengan diameter tertentu, akan mengakibatkan kuantitas energi potensial gravitasi dan energi kinetik tertentu pula.

Pada penerapan neraca energi untuk mengevaluasi kasus-kasus termodinamika dengan meninjau suatu alat mekanik tertentu, komponen energi potensial gravitasi (E_p) dan energi kinetik (E_k) umumnya diabaikan pengaruhnya. Pengasumsian ini harus diterapkan dengan tepat sesuai dengan kenyataan komparasi kondisi titik input dan titik output pada instalasi alat yang akan dievaluasi atau ditinjau.

C.1. Energi potensial gravitasi (E_p)

Energi potensial gravitasi adalah energi yang timbul atau terkandung dalam materi/materi karena materi/materi tersebut memiliki beda elevasi (ketinggian) tertentu terhadap bidang referensi. Jika pada suatu saat materi bermassa m berada pada ketinggian $x = z$ terhadap bidang referensi $x = 0$, sedangkan percepatan gravitasi lokal daerah tersebut sebesar g , maka **energi potensial gravitasi (E_p)** yang dimiliki oleh materi tersebut dapat diturunkan sebagai berikut:



The diagram illustrates a mass m (represented by a black circle) at a height $x = z$ above a reference level $x = 0$. A vertical arrow points downwards from the mass to the reference level, labeled "Percepatan gravitasi lokal, g ". The reference level is marked with two 'X' symbols. The mass is labeled "Massa, m ".

$$\delta W = F dx$$

$$\delta W = \frac{m}{g_c} g dx \Rightarrow \int \delta W = \int_{x=0}^{x=z} \frac{m}{g_c} g dx =$$

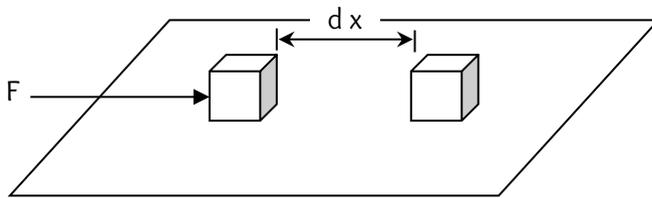
$$W = \frac{m}{g_c} g z = E_p \quad \dots(3.6)$$

Energi potensial gravitasi dalam bentuk perumaterinya dirumuskan:

$$\Delta E_p = \frac{m}{g_c} g \Delta z \quad \dots(3.7)$$

C.2. Energi kinetik (E_k)

Energi kinetik dapat didefinisikan sebagai energi yang dimiliki oleh materi/materi karena materi/materi tersebut bergerak dengan kecepatan tertentu. Rumusan energi kinetik yang dimiliki oleh materi/materi bermassa m dan bergerak dengan kecepatan v dapat diturunkan sebagai berikut:



$$\delta W = F dx$$

$$\delta W = \frac{m}{g_c} a dx = \frac{m}{g_c} \frac{dv}{dt} dx = \frac{m}{g_c} \frac{dx}{dt} dv$$

$$\delta W = \frac{m}{g_c} v dv, \quad \text{jika diintegrasikan:} \quad \int \delta W = \int_0^v \frac{m}{g_c} v dv \quad ; \text{ akan}$$

diperoleh:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{g_c} v^2 = E_k \quad \dots(3.8)$$

Persamaan energi kinetik tersebut dalam bentuk perumaterinya dirumuskan sebagai:

$$\Delta E_K = \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{g_c} \Delta v^2 \quad \dots(3.9)$$

D. Panas

Panas merupakan bentuk energi yang bersifat tidak permanen eksistensinya dalam suatu materi. Demikian pula dengan kerja. Oleh karena itu, panas dan kerja dikatakan sebagai energi dalam transit dari satu materi ke materi yang lain, atau antara sistem dengan lingkungannya. Dalam pengertian termodinamika, panas tidak pernah dianggap tersimpan di dalam suatu materi. Ketika energi dalam bentuk panas ditambahkan ke suatu materi, energi ini tidak tersimpan sebagai panas, akan tetapi sebagai energi kinetik dan energi potensial dari atom-atom dan molekul-molekul penyusun materi itu.

Panas hanya timbul jika gaya dorongnya (*driving force*) yaitu beda suhu antar dua atau lebih dari bagian materi, mempunyai nilai tertentu. Ketika beda suhu bernilai nol, dikatakan telah tercapai kesetimbangan termal, maka eksistensi panas akan lenyap. Hal ini dikenal sebagai Hukum ke-nol Termodinamika.

Panas sebagai salah satu bentuk energi, ternyata memiliki kekomplekan yang lebih jika dibandingkan dengan energi bentuk lain. Kenyataan ini timbul karena panas sendiri dalam banyak peristiwa dapat muncul dalam berbagai jenis. Pada peristiwa pembuatan uap air dari air umpan boiler misalnya, setidaknya ada

dua jenis panas yang terlibat, yaitu panas sensibel dan panas perumateri fase. Secara lebih rinci, akan dijelaskan dua hal yang terkait dengan panas, yaitu tentang kapasitas panas dan jenis-jenis panas serta rumusan/estimasinya.

D.1 Kapasitas panas

Kapasitas panas dari suatu materi didefinisikan sebagai jumlah panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu materi tersebut sebesar satu derajat. Tiap-tiap materi karena memiliki sifat-sifat yang spesifik, maka kapasitas panas setiap materi juga akan berbeda-beda. Untuk menaikkan suhu materi sebesar satu derajat, diperlukan sejumlah panas yang berbeda antara materi yang satu dibandingkan dengan materi yang lainnya. Rumusan dasar dari kapasitas panas adalah sebagai berikut:

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad \dots(3.10)$$

dengan: C = kapasitas panas, $\frac{\text{kuantitas panas}}{\text{derajat suhu}}$

δQ = panas yang ditambahkan untuk menghasilkan perumateri suhu dT

Karena pemanasan dapat dilakukan dengan dua cara kemungkinan (pada volume atau tekanan konstan) , maka dikenal dua jenis kapasitas panas, yaitu:

1. Kapasitas panas pada volume konstan

Disimbolkan dengan:
$$C_v = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_v$$

Jika suatu materi dipanaskan pada volume konstan, maka kapasitas panas pada volum konstan dapat didefinisikan sebagai perumateri energi dalam materi terhadap suhu,

$$C_v = \left(\frac{\delta U}{dT} \right)_v \quad \dots(3.11)$$

2. Kapasitas panas pada tekanan konstan

Disimbolkan dengan:
$$C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p$$

Jika suatu materi dipanaskan pada tekanan konstan, maka kapasitas panas pada tekanan konstan dapat didefinisikan sebagai perumateri entalpi materi terhadap suhu,

$$C_p = \left(\frac{\delta H}{dT} \right)_p \quad \dots(3.12)$$

Penurunan Persamaan (3.11) dan Persamaan (3.12) akan dibahas lebih lanjut di Bab 6 tentang Hukum I Termodinamika.

Kapasitas panas materi dalam bentuk lain dapat dinyatakan untuk tiap massa atau tiap mol materi. Hal ini merujuk pada konsep bahwa di termodinamika dikenal apa yang disebut dengan sifat spesifik (*specific properties*). Jika kapasitas panas suatu materi dinyatakan untuk tiap massa materi, besaran termodinamika yang

diperoleh dikenal sebagai kapasitas panas jenis (*specific heat capacity*), c . Sedangkan bila kapasitas panas suatu materi dinyatakan untuk tiap mol materi, besaran termodinamika yang diperoleh dikenal sebagai kapasitas panas jenis molar (*molar specific heat capacity*), C_m .

Pada gas, pengaruh tekanan terhadap kapasitas panas pada tekanan di bawah 1 atm dan di bawah suhu kritik, dapat diabaikan. Kondisi seperti ini merupakan kondisi pendekatan untuk gas ideal. Pada tekanan yang lebih tinggi, kapasitas panas pada tekanan konstan akan meningkat seiring dengan peningkatan tekanan dan mencapai nilai tak berhingga pada titik kritik. Sedangkan pada tekanan di atas tekanan kritik, pengaruh tekanan akan berkurang dengan naiknya suhu. Data-data tentang kapasitas panas dari gas di banyak literatur, umumnya dinyatakan sebagai fungsi suhu. Hal ini menginformasikan bahwa data kapasitas panas dari gas tersebut merujuk pada kapasitas panas untuk gas ideal. Kapasitas panas gas ideal telah ditabulasikan oleh API Research Project 44 pada tahun 1983. Ekspresi rumusan $C_{p,m}$ (kapasitas panas molar) dari gas ideal sebagai fungsi suhu, misalnya adalah sebagai berikut:

$$C_{p,m}^{ig}/R = A + BT + CT^2 + DT^{-2}$$

dengan A, B, C dan D adalah konstanta, sedangkan R adalah tetapan gas universal atau ideal.

Untuk kapasitas panas dari materi padat, menunjukkan kecenderungan bahwa kapasitas panas materi padat akan naik secara moderat dengan naiknya suhu. Sedangkan tekanan tidak memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap nilai kapasitas panas padatan.

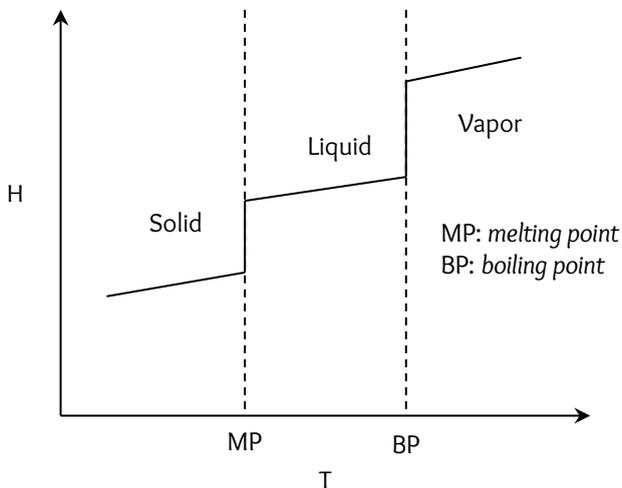
Kapasitas panas dari cairan biasanya lebih besar dibanding pada kondisi padat dan uapnya. Kapasitas panas cairan secara normal meningkat seiring dengan meningkatnya suhu. Tekanan memiliki pengaruh yang moderat terhadap sifat cairan. Untuk larutan berair, kapasitas panas akan semakin menurun dengan konsentrasi zat terlarut (*solute*) di dalam larutan.

D.2 Jenis-jenis panas dan rumusan untuk estimasinya

Seperti yang sudah dipaparkan pada awal sub bab tentang Panas, bahwa pada banyak fenomena akan melibatkan beberapa jenis panas. Dalam banyak fenomena tersebut, sejumlah panas kemungkinan diserap oleh sistem dari lingkungan, atau mungkin dilepaskan oleh sistem ke lingkungan. Pada sus bab ini akan diuraikan seperlunya tentang beberapa jenis panas, yaitu: panas laten, panas sensibel, panas pembentukan, panas reaksi dan panas pembakaran.

1. Panas laten, λ

Panas laten merupakan panas yang diserap atau dilepaskan pada peristiwa perumateri fase suatu senyawa murni pada suhu konstan. Plot skematik antara entalpi (H) dari suatu senyawa murni terhadap suhu (T) diilustrasikan pada Gambar 3.5 berikut:



Gambar 3. 5 Skema plot antara H terhadap T pada senyawa murni

Selanjutnya akan ditinjau dua jenis panas laten, yaitu panas peleburan dan panas penguapan.

a. Panas peleburan

Ketika suatu padatan kristal melebur pada titik lelehnya untuk membentuk fase cairnya pada suhu konstan, sejumlah panas diserap akibatnya entalpi dari materi meningkat. Panas yang demikian itu disebut panas peleburan suatu senyawa.

Banyak metode telah diperkenalkan untuk memperkirakan panas peleburan, seperti misalnya metode yang diajukan oleh Reid, Prausnitz dan Sherwood (1978). Meskipun demikian, tidak ada metode yang sangat akurat. Panas peleburan beberapa senyawa murni dapat dilihat pada buku-buku literatur.

b. Panas penguapan

Saat suhu dari suatu cairan ditingkatkan, suatu titik dicapai dimana cairan akan menguap diiringi dengan penyerapan panas yang diperlukan untuk mengatasi gaya tarik antar molekul dalam cairan, dan juga guna memberikan sejumlah energi yang dibutuhkan uap untuk berekspansi melawan tekanan eksternal. Panas yang diserap tersebut dikenal sebagai panas laten penguapan dari cairan dan merupakan fungsi dari suhu dan tekanan.

Metode-metode untuk memperkirakan panas laten penguapan, misalkan adalah metode yang dikembangkan oleh Clapeyron (1834), Clausius-Clapeyron dan Watson (1931, 1943). Rumusan dari masing-masing metode tersebut adalah sebagai berikut:

- Metode Clapeyron

$$\frac{dP^\circ}{dT} = \frac{\lambda}{T(v_g - v_l)} \quad \dots(3.13)$$

dengan P° = tekanan uap; T = suhu absolut; λ = panas laten penguapan pada suhu T ; v_g = volume spesifik uap jenuh; dan v_l = volum spesifik cairan jenuh.

- Metode Clausius-Clapeyron

Metode ini merupakan rumusan Clapeyron yang dimodifikasi oleh Clausius.

Rumusan:

$$\frac{dP^\circ}{P^\circ} = \frac{\lambda}{R T^2} dT \quad \dots(3.14)$$

Jika λ independen terhadap suhu, hasil integrasi terhadap Persamaan (3.14) adalah:

$$\ln \frac{P_2^\circ}{P_1^\circ} = -\frac{\lambda}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

Nampak dari persamaan terakhir bahwa dibutuhkan dua nilai suhu dan tekanan pada kondisi jenuh dari suatu senyawa yang ditinjau. Metode ini akan cukup akurat jika range suhu yang diambil sekecil mungkin.

- Metode Watson

Rumusan:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \left(\frac{1 - T_{r,2}}{1 - T_{r,1}} \right)^{0.38} \quad \dots(3.15)$$

dengan $T_{r,1,2} = \text{suhu tereduksi} \left(\frac{T_{...}}{T_c} \right)$ pada T_1 dan T_2 , T_c adalah suhu kritis materi.

Metode Watson tersebut digunakan untuk memperkirakan panas laten pada satu suhu jika panas laten pada suhu yang lain diketahui. Subscript 1 biasanya direferensikan pada titik didih normal (titik didih pada tekanan 1 atm).

Nampak jelas, berdasarkan Persamaan (3.15) tersebut, panas laten penguapan dianggap independen terhadap tekanan.

2. Panas sensibel, Q

Panas sensibel adalah panas yang mengiringi peristiwa kenaikan atau penurunan suhu dari materi. Materi dapat berupa senyawa murni atau campuran. Pada peristiwa kenaikan suhu, berarti sistem menyerap sejumlah panas (pemanasan). Dan sebaliknya, sejumlah panas akan dilepaskan sistem pada peristiwa penurunan suhu (pendinginan).

Rumusan untuk menghitung panas sensibel tergantung pada jenis proses yang terlibat pada peristiwa perumateri suhu itu, apakah dilakukan pada tekanan konstan atautkah pada volume konstan. Jika pemanasan atau pendinginan dilakukan pada tekanan konstan, panas sensibel dari senyawa murni dirumuskan dengan:

$$Q = \int_1^2 C_p dT \quad \dots(3.16)$$

Jika materi berupa campuran, maka panas sensibel dari campuran tersebut dapat ditentukan dengan pendekatan:

$$Q = \int_1^2 \sum x_i C_{p_i} dT \quad \dots(3.17)$$

dengan: x_i = fraksi massa atau fraksi mol tiap komponen penyusun campuran; C_{p_i} = kapasitas panas tiap komponen penyusun campuran.

Sedangkan apabila pemanasan atau pendinginan dilakukan pada volume konstan, rumusan sensibel mirip seperti yang diekspresikan pada Persamaan (3.16) dan (3.17), dengan *subscript* P diganti V.

3. Panas pembentukan standar, ΔH_f°

Panas pembentukan dari suatu senyawa didefinisikan sebagai panas yang dibutuhkan untuk membentuk senyawa tersebut dari unsur-unsur penyusunnya pada kondisi standar, yang secara normal ditentukan pada 25 °C dan tekanan 1 atm. Reaktan pada reaksi pembentukan ini hanya berupa unsur-unsur stabil pada kondisi tersebut, sedangkan senyawa bertindak sebagai produk

reaksi. Unsur-unsur bebas ditentukan memiliki panas pembentukan bernilai nol.

Panas pembentukan bernilai positif menunjukkan bahwa pada reaksi pembentukan suatu senyawa dari unsur-unsur bebasnya disertai penyerapan kalor. Senyawa seperti ini disebut senyawa endotermik. Dan sebaliknya, jika disertai pelepasan panas, senyawa yang terbentuk disebut senyawa eksotermik.

4. Panas reaksi, ΔH_R

Panas reaksi didefinisikan sebagai panas yang terlibat pada reaksi kimia. Panas dapat diserap oleh sistem reaksi, atau mungkin dilepaskan. Panas reaksi standar untuk reaksi kimia merupakan selisih antara total panas pembentukan dari komponen produk reaksi terhadap total panas pembentukan dari komponen reaktan pada tekanan 1 atm dan suhu 25 °C.

Pada kenyataannya, banyak reaksi aktual tidak dilakukan pada suhu 25 °C. Untuk menentukan panas reaksi yang dilakukan pada suhu di atas suhu standar, perhitungan dilakukan dengan dasar konsep bahwa entalpi merupakan fungsi keadaan. Uraian lebih lanjut tentang panas reaksi ini (juga tentang panas pembakaran) akan dibahas di Bab 6 tentang Hukum I Termodinamika.

Evaluasi Bab 3

(Soal-Penyelesaian dan Soal Latihan)

A. Soal dan Penyelesaian

1. A pump is used to deliver $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ of hydraulic oil, assumed incompressible, at a pressure of 1 kbar from a reservoir at 1 bar. What power is required to operate it?

Penyelesaian:

Analisis kasus:

Jenis sistem adalah sistem terbuka atau proses alir

Fluida kerja yang dipakai berupa fluida cair yang diasumsikan sebagai fluida inkompresibel, yang berarti bahwa densitas atau volum spesifik dari fluida tersebut tidak secara signifikan dipengaruhi oleh perubahan yang besar pada tekanan dan suhunya.

Asumsi bahwa perubahan energi potensial dan kinetiknya adalah nol. Asumsi ini relatif akurat diterapkan pada pompa.

Berdasarkan analisis kasus yang pertama dan ketiga, dapat disimpulkan bahwa kerja/tenaga reversibel pada operasi pemompaan tersebut adalah menggunakan Persamaan (3.5).

Karena proses berupa proses alir, maka volume harus dinyatakan sebagai laju volumetrik (debit), sehingga Persamaan (3.5) menjadi:

...(i)

Sedangkan berdasarkan analisis kasus kedua, hasil integrasi terhadap Persamaan (i) akan diperoleh:

$$W = V (P_2 - P_1) \quad \dots(ii)$$

Dengan memasukkan semua data yang diketahui, dapat dihitung nilai dari tenaga pemompaan tersebut, yaitu sebesar:

$$W = 0,001 \cdot (1000 - 1)\text{bar} \cdot \dots = 99,9 \text{ kW}$$

Catatan: Faktor konversi: $1 \text{ kN m} = 1 \text{ kJ}$; $1 \text{ kJ/s} = 1 \text{ kW}$

2. A turbo-compressor is used to compress carbon dioxide from 1 to 20 bar. Assuming that process can be carried out reversibly and isothermally at 300 K, calculate the work required per mole! Given that at 300 K the P-V-T properties of carbon dioxide follow the equation $P(-b) = RT$ with $b = -0.00011 \text{ m}^3/\text{mol}$.

Penyelesaian:

Analisis kasus:

Jenis sistem adalah sistem terbuka atau proses alir

Fluida kerja yang dipakai berupa gas yang mengikuti hubungan: $P(-b) = RT$ dengan $b = -0.00011 \text{ m}^3\text{mol}^{-1}$

Proses berlangsung secara isothermal (suhu konstan)

Asumsi bahwa perubahan energi potensial dan kinetiknya adalah nol. Asumsi ini relatif akurat jika diterapkan pada kompresor satu tahap.

Sehingga: $W_m = dP \dots (3.5)$

Selanjutnya mencari hubungan V_m sebagai fungsi P. Dengan persamaan keadaan yang diberikan, diperoleh hubungan P-T berikut:

$$V_m = + b.$$

Jika hubungan ini disubstitusikan ke Persamaan (3.5), maka Persamaan (3.5) akan menjadi:

$$W_m = + Dp \dots (i)$$

Hasil integrasi terhadap Persamaan (i) akan diperoleh:

$$W_m = RT \ln + b (P_2 - P_1) \dots (ii)$$

Dengan memasukkan data dan sifat termodinamika yang diketahui dari gas CO_2 (pada soal), nilai kerja kompresi sebesar:

$$W_m = 8,314 \cdot 300 \text{ K} \cdot \ln$$

$$-0,0001 \cdot (20-1)\text{bar} \cdot$$

$$W_m = 7262,9 \text{ kJ/kmol} = 7,26 \text{ kJ/mol}$$

B. Soal Latihan

1. Suatu gas diisikan ke dalam silinder berdiameter 0,47 m yang dilengkapi sebuah piston, dan di atasnya terdapat beban diam. Massa piston dan beban sebesar 150 kg. Percepatan gravitasi lokal adalah $9,813 \text{ m/s}^2$, dan tekanan atmosferik adalah 101,57 kPa. Gas di dalam silinder dipanaskan, akibatnya gas terekspansi kemudian mendorong piston dan beban ke atas, sehingga piston dan beban terangkat sejauh 0,83 m. Berapa kerja yang dilakukan gas (dalam kJ)? Berapa perubahan energi potensial dari piston dan beban?

(Jawaban: $W_{\text{gas}} = 7,25 \text{ kJ}$, $\Delta E_{\text{P, piston+beban}} = 1,22 \text{ kJ}$)

2. Sebuah mobil memiliki massa 1250 kg sedang melaju pada kecepatan 40 m s^{-1} . Berapa energi kinetik mobil (dalam kJ)? Berapa kerja yang diperlukan untuk menghentikan mobil tersebut?

(Jawaban: $E_{\text{K, mobil}} = 1000 \text{ kJ}$, $W_{\text{Stop}} = -1000 \text{ kJ}$)

3. Turbin pada suatu PLTA diumpani air terjun dari ketinggian 50 m. Dengan mengasumsikan efisiensi pengkonversian dari energi potensial menjadi energi listrik sebesar 91%, dan 8% daya listrik hilang ke lingkungan selama transmisi, berapa laju alir massa air yang dibutuhkan untuk menyalakan sebuah lampu bolam 200 watt?

(Jawaban: $\dot{m}_{\text{air}} = 0,48 \text{ kg/s}$)

4. Hitunglah energi dalam dari uap air (cair jenuh) pada $200 \text{ }^\circ\text{C}$ dan 1554,9 kPa. Pada kondisi tersebut, densitas dan entalpi dari uap air masing-masing sebesar $0,8651 \text{ g/cm}^3$ dan $852,4 \text{ kJ/kg}$.

(Jawaban: $U = 850,60 \text{ kJ/kg}$)

5. Suatu cairan yang belum teridentifikasi memiliki tekanan uap sebesar 88 mmHg pada $45 \text{ }^\circ\text{C}$ dan 39 mmHg pada $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Dengan menggunakan bantuan persamaan Clausius-Clapetron, berapa panas penguapan cairan tersebut.

(Jawaban: $\lambda = 32 \text{ kJ/kmol}$)

6. Diberikan bahwa panas laten penguapan air pada suhu 100 °C adalah 541,68 kal/g. Perkirakan panas laten penguapan air pada suhu 200 °C?

(Jawaban: $\lambda = 455,67$ kal/g, sedangkan dengan *steam table* diperoleh sebesar 465,77 kal/g)

7. Berapa suhu akhir suatu cairan yang dipanaskan dengan memasukkan panas sejumlah 4×10^6 Btu, jika cairan tersebut bersuhu awal 500 °F sebanyak 200 lb_{mol}? Pemanasan dapat dianggap berlangsung pada tekanan konstan. Kapasitas panas spesifik molar dari cairan sebagai fungsi suhu diberikan dalam persamaan berikut:

$$\frac{C_{p,m}}{R} = 22,6 - (1,01 \times 10^{-2})T + (0,193 \times 10^{-3})T^2$$

dengan $R = 1,986$ Btu lb_{mol}⁻¹ R⁻¹.

(Jawaban: $T_{\text{akhir}} = 628,15$ °F)

8. Sebuah peluru bermassa 10 gram ditembakkan dengan kecepatan 300 m/s ke sebuah papan kayu yang tebalnya 20 cm. Jika peluru tersebut keluar dari papan kayu dengan kecepatan sebesar 100 m/s, berapa gaya penahan pada papan kayu tersebut terhadap peluru?

(Jawaban: $F_{\text{penahan}} = 2000$ N)

9. Suatu air terjun memiliki jarak jatuh air sekitar 50 m. Berapa perbedaan suhu air antara di puncak dan di dasar air terjun tersebut? Ambil asumsi nilai C_p air 4,2 J kg⁻¹ K⁻¹.

(Jawaban: $\Delta T_{\text{air}} = 0,119$ °C)

IV. DIAGRAM & TABEL TERMODINAMIKA

A. Tinjauan Umum

Pada Bab 2 tentang Konsep Dasar Termodinamika telah disinggung bahwa sistem (materi kerja) dapat berada dalam beberapa kondisi (*state*) yang deskripsi lengkapnya diberikan oleh sifat-sifat termodinamika (*thermodynamic properties*) dari sistem tersebut. Kondisi sistem secara sederhana dapat dirujuk pada fasa tunggal dari sistem, apakah berupa padat, cair atau gas.

Kondisi sistem sendiri sebenarnya lebih kompleks cakupannya dibanding hanya sekedar merujuk pada fasa tunggal dari sistem. Salah satu contoh kekomplekan tersebut adalah adanya beberapa daerah dari kondisi sistem yang berada pada kondisi intermediet antar fasa, dimana pada daerah-daerah intermediet ini tentunya juga memiliki sifat-sifat termodinamika tertentu. Sebagai salah satu contoh misalnya pada peristiwa evaporasi air. Pada evaporasi air, air yang awalnya berfasa cair (*liquid*) menerima sejumlah kalor yang digunakan untuk meningkatkan suhu sampai dicapai suhu didihnya. Kalor yang terus ditambahkan ke sistem (air), kemudian digunakan untuk perubahan fasa. Pada perubahan fasa ini tercapai daerah intermediet, dimana pada daerah intermediet tersebut kondisi dari sistem dapat berupa tiga kemungkinan kondisi, yaitu: cair jenuh (*saturated liquid*), uap basah (*wet vapor*) atau uap jenuh (*saturated vapor*). Penjelasan lebih luas tentang

kekomplesan dari kondisi sistem dibahas pada sub bab B tentang Fasa dan Aturan Fasa.

Berdasarkan uraian di atas, dapat dikatakan bahwa kondisi sistem merupakan “variabel terikat” dengan “variabel bebas”-nya adalah sifat termodinamika. Untuk merepresentasikan sistem termodinamika dapat diberikan dalam bentuk diagram/grafik atau tabel. Diagram/grafik dan tabel ini memuat sekumpulan sifat termodinamika dari materi kerja. Sifat termodinamika yang umumnya dilibatkan pada diagram dan tabel termodinamika materi kerja/senyawa murni (*pure substances*) adalah tekanan (P), suhu (T), volum spesifik (v), kualitas uap/fraksi uap (x), entalpi (H) dan entropi (S). Pada sistem yang berupa senyawa murni, dengan menggunakan minimal dua sifat termodinamika, maka akan diketahui kondisi dari senyawa tersebut, dan akan diketahui pula nilai dari sifat termodinamika lainnya.

B. Fasa dan Aturan Fasa

Pengalaman menunjukkan bahwa eksistensi senyawa dapat berupa fasa padat, cair atau gas. Pada banyak hal, informasi tentang jenis fasa dari senyawa yang terlibat dalam suatu operasi, proses dan evaluasi atau perancangan alat, sangat penting untuk diketahui. Satu kasus sederhana misalnya pada pemilihan alat transportasi material. Pada pemilihan jenis alat transportasi material, pertimbangan dan informasi pertama yang harus diketahui adalah tentang jenis fasa dari material yang akan dipindahkan, di samping tentunya informasi-informasi lainnya.

Senyawa murni pada kesempatan lain dapat pula berada dalam bentuk gabungan dua fasa tunggal, yaitu padat dan cair (S + L), padat dan gas (S + G), atau cair dan gas (L + G). Pada sistem berupa gabungan dua fasa tunggal ini, definisi lengkap dari sistem dapat ditentukan cukup dengan menyepesifikasi salah satu sifat termodinamikanya, misalnya tekanan atau suhu. Suatu sistem yang berada dalam kondisi berupa gabungan dua fasa tunggal dikatakan bahwa sistem tersebut sedang berada dalam kondisi kesetimbangan. Oleh karena itu himpunan titik-titik koordinat yang merupakan gabungan antar sifat termodinamika pada kondisi berupa gabungan dua fasa tunggal, akan membentuk suatu kurva yang disebut sebagai kurva kesetimbangan (*equilibrium curves*).

Kurva kesetimbangan a-d-e-f (kurva kesetimbangan padat-cair/ *melting curve* atau *fusion curve*) membentuk daerah kondisi sistem berupa gabungan fasa tunggal (S + L), sekaligus memisahkan dari kondisi sistem yang lain. Daerah tersebut merupakan daerah perubahan fasa dari fasa padat menjadi fasa cair (peleburan), atau sebaliknya (pembekuan/ kristalisasi). Daerah sistem berupa gabungan fasa tunggal (S + G) dibatasi oleh kurva kesetimbangan d-a-b-h-g (kurva kesetimbangan padat-gas/ *sublimation curve*). *Sublimation curve* adalah daerah perubahan fasa dari padat menjadi gas (sublimasi), atau sebaliknya. Sedangkan kurva kesetimbangan a-c-b (kurva kesetimbangan cair-gas/ *evaporation curve*). Kurva ini membatasi daerah terjadinya peristiwa

perubahan fasa dari cair menjadi uap (evaporasi), atau sebaliknya (kondensasi).

Kondisi sistem yang lain seperti yang terlihat pada Gambar 4.1 adalah kondisi kritis. Titik koordinat dari kondisi kritis ini dikenal sebagai titik kritis gas-cair (*gas-liquid critical point*) atau sering disingkat dengan titik kritis (*critical point*) saja. Titik kritis ini ditunjukkan pada Gambar 4.1 dengan titik c. Titik kritis merupakan titik pada senyawa murni yang menyatakan tekanan dan suhu tertinggi pada kondisi gabungan fasa tunggal cair dan uap. Atau dengan pernyataan lain, titik kritis adalah tekanan dan suhu tertinggi dimana senyawa murni dapat berada dalam kesetimbangan uap-cair. Titik kritis merupakan batas tertinggi terjadinya perubahan fasa cair-uap secara evaporasi. Titik kritis juga pembatas absolut antara fasa tunggal cair dengan fasa tunggal gas, sehingga pada daerah di atas titik kritis, cair dan gas memiliki sifat-sifat yang identik.

Kondisi lainnya dari sistem adalah sistem berupa gabungan tiga fasa (padat + cair + gas). Kondisi ini disebut sebagai titik tripel (*triple point*). Pada Gambar 4.1 dinyatakan dengan titik t. Pada titik tripel ini, antara fasa cair, padat dan gas memiliki sifat yang identik, atau memiliki kelakuan tidak bisa dibedakan. Data titik kritis dan titik tripel beberapa senyawa murni ditampilkan pada Tabel 4.1.

Sebelumnya telah disinggung beberapa kasus pengidentifikasian kondisi sistem yang dilakukan dengan penyepesifikasian sifat termodinamika sistem. Salah satu kasus

tersebut misalnya adalah pada identifikasi sistem (senyawa murni) yang berupa fasa tunggal. Pada kondisi sistem (senyawa murni) berupa fasa tunggal, diperlukan dua sifat termodinamika agar sistem murni yang ditinjau dapat diketahui semua sifat termodinamikanya secara lengkap. Metode analisa sifat-sifat termodinamika dari sistem seperti yang diuraikan tersebut, adalah merupakan penerapan aturan fasa dari Gibbs.

Tabel 4.1. Titik Kritik dan Titik Tripel beberapa Senyawa Murni

Senyawa	Titik tripel		Titik kritik		
	p^t (bar)	T^t (K)	P_c (bar)	T_c (K)	v_c ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)
Helium, He	-	-	2,291	5,2	14,43
Hidrogen, H_2	0,07	14	12,8	33	33,2
Karbon dioksida, CO_2	5,18	220,6	73,82	304,21	2,146
Air, H_2O	0,006	273,16	221,2	647,3	3,17
Merkuri, Hg	$1,3 \times 10^{-9}$	234,3	1150	1765	-0,2

Penerapan aturan fase dari Gibbs akan dapat ditentukan derajat kebebasan (*degree of freedom*), F , dari sistem yang ditinjau. Derajat kebebasan menunjukkan berapa banyak sifat termodinamika yang dapat dengan bebas kita spesifikasi agar kita dapat mengidentifikasi sistem secara lengkap. Ada dua informasi yang diperlukan untuk menentukan derajat kebebasan sistem, yaitu:

- Jumlah komponen (C)

Jumlah komponen merupakan berapa banyak komponen yang menyusun sistem. Komponen secara mudah dapat dirujuk pada jenis senyawa tunggal yang menyusun sistem. Oleh karena itu, berdasarkan jumlah komponen penyusunnya, sistem dapat dibedakan menjadi dua jenis sistem, yaitu sistem mono komponen (senyawa murni) dan sistem multi komponen (senyawa campuran).

Jika pada sistem tidak melibatkan reaksi kimia, jumlah komponen dengan mudah dapat ditentukan, yaitu sama dengan jumlah senyawa tunggal yang ada pada sistem tersebut. Sebagai contoh misalnya sistem larutan yang terdiri dari etanol dan air, maka jumlah komponen dari sistem adalah $C = 2$.

- Jumlah fasa (P)

Fasa adalah bagian makroskopik dari material yang memiliki sifat-sifat intensif (seperti: tekanan, suhu, komposisi, densitas, entalpi parsial, konstanta dielektrik, dan lain sebagainya) yang homogen. Jadi fasa terkait dengan kehomogenan sifat intensif. Untuk sistem yang berupa multi komponen, karena setiap komponen membawa sifat-sifat intensif masing-masing, maka tiap komponen akan mempengaruhi jumlah fasa pada sistem. Interaksi antar komponen penyusun sistem yang mampu membentuk

campuran yang semakin homogen, akan mengarah ke kecenderungan membentuk satu fasa.

Sistem yang tersusun oleh komponen-komponen dimana masing-masing komponen berfasa gas, jumlah fasa dari sistem adalah satu fasa. Hal ini karena interaksi antar molekul-molekul gas sangat cepat mampu membentuk campuran dengan sifat intensif yang homogen. Keadaan ekstrim berlaku untuk sistem yang tersusun oleh komponen-komponen berfasa padat. Pada sistem padat seperti ini, jumlah fasa dari sistem adalah sejumlah komponen penyusun sistem padat tersebut. Campuran padat selalu berupa sistem yang heterogen. Sedangkan untuk sistem yang berupa campuran gas-cair dan padat-cair, penentuan jumlah fasa tergantung pada sejauh mana kehomogenan dari sifat-sifat intensif dari campuran itu.

Hubungan matematik dari jumlah fasa, jumlah komponen dan derajat kebebasan dengan sistem tanpa reaksi kimia telah diperkenalkan oleh J. Willard Gibbs (1875), yang diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P + F = C + 2 \quad \dots(4.1)$$

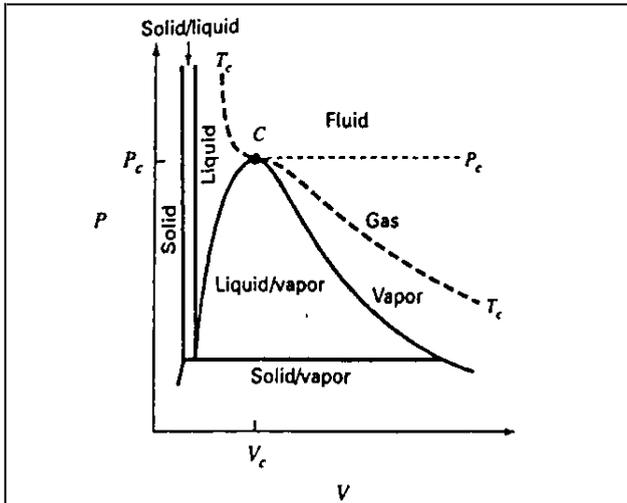
C. Diagram Termodinamika

Diagram termodinamika merupakan bentuk penyajian hubungan antara sifat-sifat intensif termodinamika dari suatu senyawa murni dalam koordinat kartesian. Diagram termodinamika suatu senyawa murni dapat berupa 2 dimensi (koordinat kartesian dengan 2 sumbu) atau 3 dimensi (koordinat kartesian dengan 3 sumbu). Namun umumnya, diagram termodinamika dari suatu senyawa murni ditampilkan dalam bentuk koordinat kartesian 2 sumbu. Setiap sumbu mewakili variasi nilai suatu sifat termodinamika dari senyawa murni dengan interval nilai tertentu.

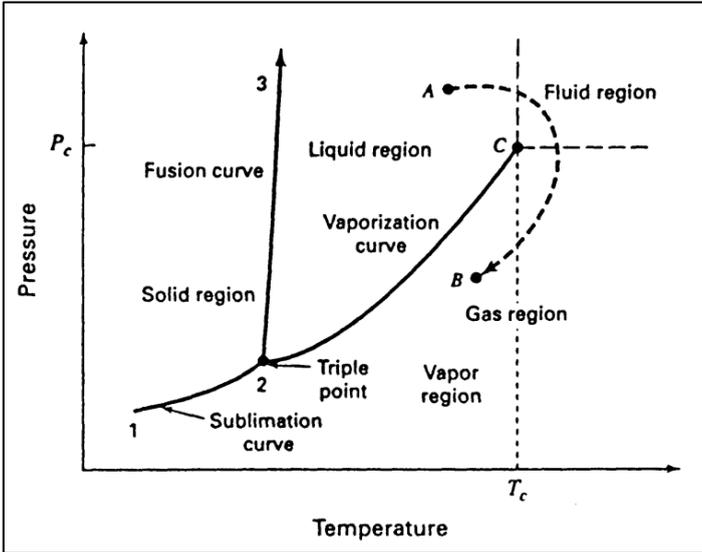
Pada diagram termodinamika dalam bentuk 2 dimensi, dapat disajikan dengan atau tanpa menyertakan parameter sifat termodinamika lainnya. Sedangkan penamaan dari suatu diagram termodinamika didasarkan pada jenis sifat termodinamika yang diplotkan pada sumbu vertikal (ordinat) dan jenis sifat termodinamika yang diplotkan pada sumbu horizontal (absis). Sebagai contoh, jika jenis sifat termodinamika yang diplotkan pada sumbu vertical dan horizontal masing-masing adalah sifat termodinamika P (tekanan) dan v (volum spesifik), maka diagram termodinamika tersebut dinamai Diagram P - v .

Sifat termodinamika yang umumnya diplotkan pada diagram termodinamika adalah P (tekanan), v (volum spesifik), T (suhu), H (entalpi spesifik) dan S (entropi spesifik). Oleh karena itu, nama-nama diagram termodinamika adalah merupakan kombinasi dari dua sifat termodinamika tersebut (untuk diagram termodinamika 2

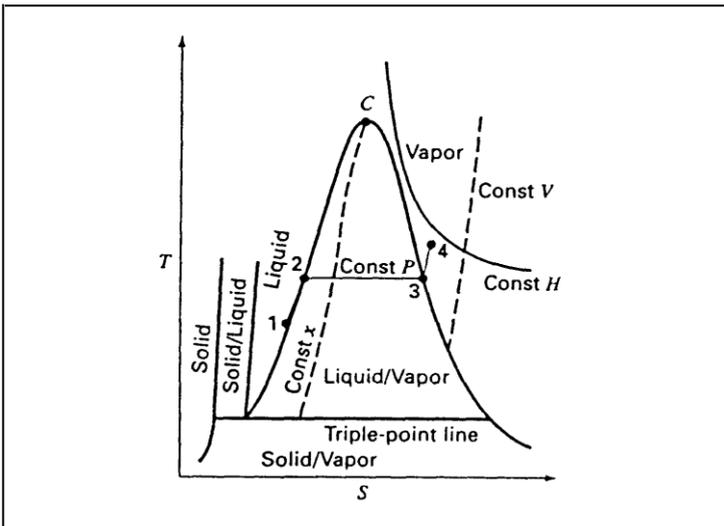
dimensi). Contoh-contoh diagram termodinamika dari senyawa murni dalam bentuk diagram dua dimensi seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.2 sampai Gambar 4.5. Sedangkan Gambar 4.1 (Diagram P-v-T) adalah contoh diagram termodinamika tiga dimensi.



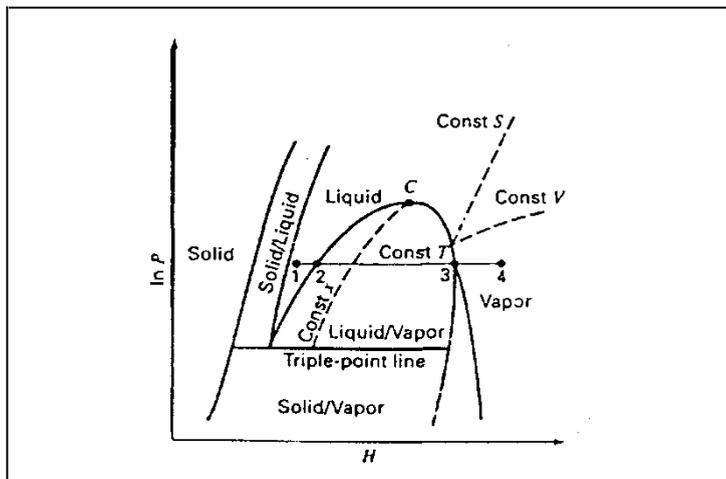
Gambar 4.2. Diagram P-V



Gambar 4.3. Diagram P-T



Gambar 4.4. Diagram T-S



Gambar 4.5. Diagram P-H

Pada diagram-diagram termodinamika yang memuat kurva kesetimbangan uap-cair (kurva evaporasi), terdapat tiga daerah kondisi dari sistem termodinamika. Daerah disepanjang kurva evaporasi di sebelah kiri titik kritik disebut daerah cair jenuh (*saturated liquid*), daerah disepanjang kurva evaporasi di sebelah kanan titik kritik disebut daerah uap jenuh (*saturated vapor*), sedangkan daerah di antara cair jenuh dan uap sejuh dikenal sebagai daerah uap basah (*wet vapor*). Daerah-daerah pada dan di antara kurva evaporasi disebut daerah jenuh (*saturated region*). Tiga jenis daerah jenuh ini dibedakan oleh sifat termodinamika yaitu kualitas uap atau fraksi uap (*vapor fraction*), yang disimbolkan dengan x .

Kualitas uap didefinisikan sebagai rasio antara massa uap terhadap massa total sistem. Atau jika dinyatakan dalam bentuk persamaan adalah:

$$x = \frac{\text{massa uap}}{\text{massa sistem}} = \frac{\text{massa uap}}{(\text{massa cair} + \text{massa uap})} \quad \dots(4.2)$$

Berdasarkan Persamaan (4.2), tampak bahwa nilai dari x adalah $0 \leq x \leq 1,0$. Nilai $x = 0$ berarti suatu sistem berada pada kondisi **cair jenuh**. Untuk daerah **uap jenuh**, nilai $x = 1$. Sedangkan daerah **uap basah** memiliki nilai x , $0 < x < 1,0$.

Sifat-sifat termodinamika yang ada di daerah jenuh adalah x , v_f , v_g , h_f , h_g , s_f dan s_g . *Subscript* f dan g masing-masing adalah kondisi cair jenuh dan uap jenuh. Hubungan antara sifat-sifat termodinamika pada daerah jenuh ini diuraikan sebagai berikut:

$$x = \frac{m_g}{(m_f + m_g)} \quad \dots(4.3)$$

$$v_{\text{mix}} = (1 - x) \cdot v_f + x \cdot v_g \quad \dots(4.4)$$

$$h_{\text{mix}} = (1 - x) \cdot h_f + x \cdot h_g \quad \dots(4.5)$$

$$s_{\text{mix}} = (1 - x) \cdot s_f + x \cdot s_g \quad \dots(4.6)$$

Subscript mix, merujuk pada kondisi uap basah (*wet vapor*).

Pada penerapan diagram termodinamika, semua jenis proses yang mengakibatkan perubahan sifat-sifat intensif dari sistem (fluida kerja) dapat digambarkan, baik proses tersebut berupa proses

tunggal, proses berantai terbuka ataupun proses berantai tertutup (siklus). Sehingga pemahaman terhadap jenis proses termodinamika dan akibatnya terhadap perubahan sifat-sifat termodinamika sistem akan lebih komprehensif.

D. Tabel Termodinamika

Tabel termodinamika, seperti halnya dengan diagram termodinamika, juga merupakan satu bentuk lain penyajian hubungan antar sifat-sifat intensif termodinamika dari senyawa murni. Jika dalam diagram termodinamika hubungan antar sifat-sifat intensif termodinamika disajikan dalam bentuk sistem koordinat kartesian, pada tabel termodinamika hubungan antar sifat-sifat intensif termodinamika disajikan dengan cara pentabelan (terdiri dari baris dan kolom) dengan cara organisasi data tertentu.

Kelebihan tabel termodinamika dibandingkan dengan diagram termodinamika adalah bahwa dengan tabel termodinamika, data dapat ditampilkan secara lebih tepat daripada penyajian data dengan diagram termodinamika. Namun pada tabel termodinamika kadang bahkan sering diperlukan interpolasi atau ekstrapolasi data, dikarenakan data yang dimaksud tidak tercantum pada tabel.

Pada tabel termodinamika dari senyawa murni, umumnya, sifat termodinamika yang diposisikan sebagai variabel bebas adalah tekanan (P) dan suhu (T). Sedangkan sifat-sifat intensif termodinamika lainnya (v , H dan S) diposisikan sebagai variabel terikat. Namun tentunya tabel termodinamika tidak hanya berupa

hubungan antara P dan T dengan sifat-sifat intensif termodinamika lainnya saja, masih ada tabel termodinamika yang disajikan dalam bentuk lainnya, misalnya tabel korelasi kompresibilitas faktor dan korelasi koefisien fugasitas.

Salah satu tabel termodinamika yang banyak dipakai untuk keperluan praktis adalah tabel uap air (*steam table*). Jenis dan penyajian tabel uap air didasarkan pada kondisi yang mungkin dialami oleh fluida kerja (air). Fluida air memiliki tiga kemungkinan kondisi, yaitu: *sub cooled water* / *compressed liquid*, *saturated* (cair jenuh, uap basah atau uap jenuh) dan *superheated*. Sedangkan organisasi data pada penampilan data di tabel, dilakukan berdasarkan derajat kebebasan yang dimiliki oleh sistem fluida air.

Pada kondisi jenuh, sistem fluida cair memiliki satu derajat kebebasan, sehingga data-data sifat termodinamika pada kondisi jenuh ini ditampilkan dalam tabel tersendiri, dan dikenal sebagai *liquid-vapor saturation table*. Sedangkan pada kondisi *sub cooled water* / *compressed liquid* dan *superheated*, sistem fluida cair memiliki dua derajat kebebasan, oleh karena itu data-data sifat termodinamika pada kedua kondisi ini ditampilkan dalam tabel tersendiri pula, dan dikenal sebagai *compressed liquid and superheated table*. Khusus pada *liquid-vapor saturation table*, satu sifat intensif yang dapat dispesifikasi secara bebas adalah tekanan (P) atau suhu (T), oleh karena dua sifat intensif termodinamika ini yang mudah diukur. Dua sifat termodinamika ini yang kemudian digunakan untuk menyajikan tabel termodinamika pada kondisi

jenuh ke dalam dua jenis tabel termodinamika, yaitu: tabel jenuh cair-uap dengan parameter P (*liquid-vapor saturation, pressure table*) dan tabel jenuh cair-uap dengan parameter T (*liquid-vapor saturation, suhu table*). Bentuk penyajian dari masing-masing jenis tabel uap air tersebut ditampilkan pada Gambar 4.6 sampai Gambar 4.8. Tabel uap air dapat ditemukan pada banyak literatur tentang termodinamika klasik.

P	T	v_f	v_g	h			s		
				h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
P_1
P_2
P_3
...
dst.

Gambar 4.6. Tampilan tabel jenuh cair-uap dengan parameter P

Tanda (...) menunjukkan bahwa nilai sifat termodinamika yang dimaksud akan terdefinisi dengan kuantitas tertentu (*fixed*). Dan *subscript* (fg) adalah selisih nilai sifat termodinamika antara pada kondisi uap jenuh terhadap kondisi cair jenuh, misalkan: $h_{fg} = h_g - h_f$.

T	P	v_f	v_g	h			s		
				h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
P_1
P_2
P_3
...
dst.

Gambar 4.7. Tampilan tabel jenuh cair-uap dengan parameter T

T	P_1			P_2			P_3			dst.		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s	v	h	s
T_1
T_2
...
dst.

Gambar 4.8. Tampilan tabel *compressed liquid* dan *superheated*

Evaluasi Bab 4

(Soal-Penyelesaian dan Soal Latihan)

A. Soal dan Penyelesaian

1. If 15 kg of H₂O vapor in a 0.4 m³ rigid container has pressure of 4 bar, determine suhu and specific entalpi of H₂O vapor!

Penyelesaian:

Analisis kasus:

Jenis sistem adalah sistem tertutup

Wadah berupa kontainer *rigid*, sehingga volum total sistem sama dengan volum wadah

Diambil asumsi tidak terdapat kebocoran pada wadah, sehingga massa sistem tetap.

Berdasarkan analisa kasus tersebut di atas, penyelesaian berikutnya adalah:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{0,4}{15} = 0,027$$

Berdasarkan data pada tabel uap air bahwa pada kondisi jenuh dengan tekanan 4 bar (= 400 kPa) diperoleh data:

$$T^{\text{sat}} = 143,64 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$v_f = 0,001084 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ dan } v_g = 0,4623 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_f = 604,91 \text{ kJ/kg} \text{ dan } h_g = 2738,5 \text{ kJ/kg}$$

Berdasarkan perbandingan nilai v terhadap nilai v_f dan v_g , tampak bahwa: $v_f < v < v_g$. Sehingga sistem berada pada kondisi uap basah/ *wet steam*.

Dengan persamaan (4.4) dapat ditentukan kualitas uap, x :

$$x = \frac{v - v_f}{v_g - v_f} = \frac{0,027 - 0,001084}{0,4623 - 0,001084} = 0,056$$

Selanjutnya dengan Persamaan (4.5) dapat dihitung entalpi spesifik dari sistem, yaitu:

$$h_{\text{mix}} = (1 - 0,056)604,91 + 0,056 \cdot 2738,5 = 724,80 \text{ kJ/kg.}$$

Sedang suhu sistem = 143,64 °C (kondisi jenuh)

2. A chemical engineering student will do purification to alcohol-water solution with the distillation method. What thermodynamic properties can be chosen by the student if he requires the distillation product with a fixed composition?

Penyelesaian:

Kasus di atas merupakan kasus penentuan derajat kebebasan.

Dari soal dapat diketahui bahwa:

Jumlah komponen, $C = 2$ (alkohol dan air)

Jumlah fasa, $P = 2$ (pada distilasi terdapat fasa uap dan cair)

Sehingga dengan Persamaan (4.1) akan diperoleh:

$$P + F = C + 2 \quad F = (2 + 2) - 2 = 2$$

Terdapat 2 derajat kebebasan pada distilasi sistem biner tersebut. Sehingga, ada 2 sifat termodinamika dari sistem yang dapat dispesifikasi secara bebas.

Oleh karena komposisi produk sudah dispesifikasi, maka sifat termodinamika yang mungkin masih bisa dispesifikasi adalah tekanan dan suhu distilasi.

V. PERSAMAAN KEADAAN

A. Fluida kerja dan Diagram P-V-T

Pada Bab 4 tentang Diagram dan Tabel Termodinamika telah diuraikan dengan cukup luas mengenai Fluida Kerja dan Diagram P-V-T. Dalam sub bab ini, pembahasan tentang fluida kerja dan Diagram P-V-T akan lebih diperluas. Pembahasan diarahkan untuk keperluan pemahaman awal tentang Persamaan Keadaan pada fluida kerja.

Fluida homogen biasanya diklasifikasikan sebagai cairan atau gas. Namun demikian, pembatasan tersebut tidak selalu dapat diterapkan secara tegas, karena kedua fasa tunggal tersebut (cair dan uap) menjadi tidak dapat dibedakan pada titik kritis. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat kembali Gambar 4.3 pada Bab 4 tentang Diagram P-T dari senyawa murni. Pada diagram tersebut tampak bahwa daerah dengan tekanan dan suhu lebih besar dari T_c dan P_c yang ditandai dengan garis lurus putus-putus melalui titik kritis, bukan merupakan batas fasa. Akan tetapi lebih merupakan batas-batas dari pengertian “kata” cair (*liquid*) dan gas (*gas*) itu sendiri. Fasa secara umum dipertimbangkan sebagai *liquid* jika evaporasi pada suhu konstan akan mengakibatkan penurunan tekanan. Sedangkan fasa dipertimbangkan sebagai gas jika kondensasi pada tekanan konstan akan mengakibatkan penurunan suhu. Karena tidak ada proses (perubahan fasa) yang terjadi daerah di atas garis lurus putus-putus melalui titik kritis, maka daerah tersebut disebut

daerah fluida. Dengan pernyataan lain, bahwa di daerah fluida tidak akan pernah terjadi perubahan fasa.

Daerah gas terkadang dibagi menjadi dua daerah, seperti yang ditunjukkan oleh garis titik-titik vertikal pada Gambar 4.3 pada Bab 4. Gas yang terletak di sebelah kiri garis pembagi tersebut, merupakan gas yang dapat dikondensasi dengan kompresi pada suhu tetap, atau dengan pendinginan pada tekanan tetap. Gas pada daerah di sebelah kiri garis pembagi ini dikenal sebagai uap (*vapor*). Sedangkan gas yang terletak di sebelah kanan garis pembagi, dimana suhunya lebih tinggi dibanding suhu kritis, diistilahkan sebagai gas superkritis (*supercritical gas*).

Hubungan antar sifat-sifat termodinamika dari fluida kerja dapat dinyatakan dalam berbagai bentuk hubungan. Salah satunya adalah dalam bentuk hubungan P-V-T. Hubungan P-V-T fluida kerja sendiri dapat dipresentasikan dalam bentuk persamaan matematik atau diagram. Satu contoh penampilan hubungan P-V-T dari fluida kerja murni dalam bentuk diagram adalah seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.1 pada Bab 4. Sedangkan hubungan P-V-T berupa persamaan matematik dibahas pada sub bab berikutnya dalam Bab 5 ini.

B. Persamaan Keadaan Gas Ideal

Persamaan keadaan dapat didefinisikan sebagai persamaan yang menyatakan hubungan antar sifat termodinamika P-V-T dari fluida kerja. Ekspresi matematik dari persamaan keadaan cukup beragam. Keberagaman tersebut disebabkan oleh karena ekspresi matematik persamaan keadaan tergantung pada pendekatan-pendekatan tertentu terhadap fluida kerjanya, seperti misalnya pendekatan terhadap kelakuan gas, apakah sebagai gas ideal atau gas nyata, akan menyebabkan ekspresi matematik dari persamaan keadaan masing-masing gas juga akan berbeda.

B.1. Tinjauan sekilas teori gas ideal

Hukum gas ideal telah dibangun oleh Boyle, Charles, dan Gay-Lussac pada abad ke-17 dan ke-18. Dua kesimpulan penting yang dihasilkan pada kurun waktu itu adalah bahwa pada gas-gas sederhana terdapat perilaku sebagai berikut:

1. pada suhu konstan, volum dari sejumlah tertentu gas, akan turun secara berbanding terbalik dengan naiknya tekanan, atau $V \sim 1/P$
2. pada tekanan konstan, volum dari sejumlah tertentu gas meningkat secara berbanding lurus dengan naiknya suhu, atau $V \sim T$

Kombinasi dari kedua hasil pengamatan tersebut diperoleh hubungan proporsional $PV \sim T$.

Pada tingkat molekular, gas ideal adalah merupakan campuran dari partikel-partikel yang keras, elastis dan inert. Antar partikel-partikel tersebut tidak terdapat interaksi. Pada gas ideal juga tidak terdapat gaya atraksi (gaya tarik-menarik) atau gaya tolak antar molekul. Gas ideal merupakan salah satu pembatasan kondisi dari materi/fluida kerja. Akibatnya, hukum gas ideal tidak dapat diaplikasikan terhadap senyawa nyata. Meskipun demikian, beberapa gas sederhana pada kondisi suhu moderat dan tinggi, dan pada tekanan rendah dan moderat, praktis akan berkelakuan sesuai dengan hukum gas ideal. Pada tekanan sama mendekati nol, semua gas mendekati hukum gas ideal.

Adanya interaksi antar molekul gas cenderung menyebabkan suatu penyimpangan dari perilaku gas ideal. Gaya tarik dan gaya tolak yang berlebih menyebabkan interaksi antar molekul semakin kuat, sehingga gas akan berperilaku menjadi lebih tidak ideal. Gas-gas inert (He, Ar, Kr, Ne) adalah sangat ideal. Gas diatomik sederhana (N_2 , O_2 , CO) adalah ideal pada suhu tinggi dan tekanan rendah. Gas-gas triatomik (CO_2 , H_2S , SO_2 , H_2O) tidak mengikuti hukum gas ideal dengan baik, kecuali pada suhu yang sangat tinggi dan tekanan yang sangat rendah. Sifat-sifat termodinamika gas ideal hanya dipengaruhi oleh suhu, dan tidak bergantung pada tekanan.

B.2. Ekspresi matematik persamaan keadaan gas ideal

Pada bagian sebelumnya telah diuraikan tentang hukum gas ideal yang dibangun oleh Boyle, Charles, dan Gay-Lussac. Kesimpulan akhir dari hasil pengamatan terhadap perilaku gas-gas sederhana adalah hubungan:

$$PV \sim T$$

Untuk jumlah mol gas sebanyak $n = 1$ mol, agar ruas kiri sama dengan ruas kanan, dimunculkan tetapan proporsionalitas, yang kemudian dikenal sebagai tetapan gas umum untuk gas sederhana (R), yaitu gas monoatomik pada tekanan rendah. Oleh karena itu hubungan $PV \sim T$ untuk n mol gas, akan menjadi:

$$PV = nRT \quad \dots(5.1)$$

Persamaan (5.1) dikenal sebagai persamaan keadaan gas ideal. Persamaan tersebut dapat dimodifikasi menjadi beberapa bentuk yang penting untuk keperluan beberapa perhitungan. Proses modifikasi tersebut adalah sebagai berikut:

$$PV = nRT \quad \dots(5.1)$$
$$P = \frac{n}{V} RT \text{ atau } P = [C]RT \quad \dots(5.2)$$
$$P \frac{V}{n} = RT \text{ atau } P V_m = R T \quad \dots(5.3)$$

$$P V = (M n) \frac{R}{M} T \text{ atau } P v = \bar{R} T \text{ atau } P = \rho \bar{R} T \quad \dots(5.4)$$

dengan: P = tekanan; V_m = volume molar;
 V = volume total; v = volume spesifik (V/m);
 n = jumlah zat dalam mol; ρ = densitas (m/V);
 R = tetapan gas umum (gas ideal);
 \bar{R} = tetapan gas individual (R/M);
 M = massa molar materi;
 $[C]$ = konsentrasi molar atau molaritas

$$R = 8,314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} = 1,986 \frac{\text{Btu}}{\text{lbmol} \cdot \text{R}}$$

$$R = 0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{liter}}{\text{mol} \cdot \text{K}}, \text{ dan sebagainya}$$

C. Persamaan Keadaan Gas Nyata

Telah banyak usaha yang dilakukan untuk memperbaiki keakuratan hukum gas ideal. Dalam upaya perbaikan ini, telah digunakan dua dasar pendekatan, yaitu:

1. Pendekatan dengan menggunakan faktor koreksi empirik. Faktor koreksi empirik tersebut diberi istilah faktor kompresibilitas, Z .

Rumusan umum dari persamaan keadaan gas nyata (untuk 1 mol gas) dengan pendekatan yang pertama ini adalah:

$$P = \frac{ZRT}{V_m} \quad \dots(5.5)$$

2. Pendekatan dengan melibatkan penambahan parameter-parameter ke dalam hukum gas ideal.

Pada pendekatan yang pertama ini, secara umum, persamaan keadaan untuk 1 mol gas diekspresikan dengan persamaan berikut:

$$P = \frac{RT}{V_m} + C_1 f(T, V_m) + C_2 f(T, V_m) + \dots \quad \dots(5.6)$$

Persamaan keadaan tersebut dikenal sebagai persamaan keadaan analitik (*analytical equation of state*). Terdapat cukup banyak variasi bentuk persamaan keadaan analitik, dimana masing-masing memiliki tingkat kompleksitas dan keakuratan masing-masing. Beberapa bentuk persamaan keadaan analitik tersebut dapat dibagi menjadi 2 jenis persamaan keadaan, yaitu:

- a. Persamaan keadaan virial (*virial equation of state*)
- b. Persamaan keadaan kubik (*cubic equation of state*), terdiri dari: persamaan van der Waals (1873), persamaan Benedict-Webb-Rubin (1940), persamaan Redlich-Kwong (1949), persamaan Redlich-Kwong-Soave (1972), persamaan Peng-Robinson (1976), dan lain sebagainya.

Pembahasan selanjutnya adalah penguraian lebih luas terhadap kedua jenis pendekatan tersebut di atas.

C.1. Persamaan keadaan gas nyata dengan faktor kompresibilitas (Z)

Seperti yang telah disampaikan di bagian sebelumnya, bahwa persamaan keadaan gas nyata dengan pendekatan menggunakan faktor kompresibilitas ini dinyatakan dengan persamaan umum:

$$P = \frac{ZRT}{V_m} \quad \dots(5.5)$$

Kuantitas dari faktor kompresibilitas (Z) biasa ditampilkan dalam bentuk tabulasi secara terpisah untuk suatu jenis senyawa sebagai fungsi suhu dan tekanan, atau diturunkan dari data eksperimen.

Alternatif lain untuk memperoleh nilai Z ini adalah didasarkan pada postulat-postulat dari teorema keadaan sama (*theorem of corresponding states*). Postulat dari teori keadaan sama menyatakan bahwa “senyawa-senyawa yang berbeda pada kondisi (tekanan tereduksi, P_r , dan suhu tereduksi, T_r) yang sama, akan memiliki volum tereduksi yang sama”. Postulat tersebut dapat pula diartikan bahwa “semua senyawa yang berada pada kondisi (tekanan tereduksi dan suhu tereduksi) yang sama, akan memiliki faktor kompresibilitas yang sama”.

Untuk senyawa murni, postulat tersebut secara sederhana dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$Z = f(P_r, T_r) \quad \dots (5.7)$$

dengan: $P_r = \frac{P}{P_C}$ dan $T_r = \frac{T}{T_C}$

P_C dan T_C masing-masing adalah tekanan kritis dan suhu kritis. Sedangkan P dan T secara berturutan adalah tekanan sistem dan suhu (dalam derajat mutlak) sistem.

Pada sistem berupa campuran senyawa, nilai dari tekanan tereduksi dan suhu tereduksi dievaluasi dengan menggunakan pendekatan konsep titik kritis semu (*pseudocritical*) yang diperkenalkan oleh Kay (1936). Rumusan-rumusan untuk memperoleh nilai dari tekanan tereduksi dan suhu tereduksi dengan konsep ini adalah sebagai berikut:

$$P_r = \frac{P}{P_{PC}} \quad \text{dan} \quad T_r = \frac{T}{T_{PC}}$$

dengan P_{PC} dan T_{PC} masing-masing adalah tekanan dan suhu (dalam derajat mutlak) kritis semu. Sedangkan nilai dari P_{PC} dan T_{PC} dicari dengan rumusan berikut:

$$P_{PC} = \sum_{i=1}^n x_i P_{C_i} \quad \text{dan} \quad T_{PC} = \sum_{i=1}^n x_i T_{C_i}$$

dengan: x = fraksi mol; P = tekanan; T = suhu; PC = kritis semu; c = kritis; i = komponen penyusun campuran

Meskipun demikian, pendekatan ini hanya dapat diaplikasikan secara tegas untuk molekul-molekul *spherical-nonpolar*.

Untuk molekul yang lebih kompleks perlu adanya penambahan parameter-parameter. Setidaknya ada tiga parameter yang telah diperkenalkan, yaitu: faktor kompresibilitas kritik (Lydersen, Hougen dan Greenkorn), faktor asentrik (Pitzer) dan α (Riedel). Faktor kompresibilitas kritik menyatakan bahwa faktor kompresibilitas dipengaruhi oleh tiga jenis parameter, yaitu tekanan tereduksi, suhu tereduksi dan faktor kompresibilitas kritik. Atau jika dinyatakan dalam persamaan sederhana:

$$Z = f(P_r, T_r, Z_c) \quad \dots(5.8)$$

Faktor kompresibilitas kritik (Z_c) dari senyawa yang ada di alam bervariasi pada kisaran 0,20 sampai 0,30. Sedangkan nilai Z_c sebagian besar senyawa jatuh pada interval 0,26 sampai 0,28. Oleh karena itu grafik hubungan Z tergeneralisasi sebagai fungsi P_r dan T_r , $Z = f(P_r, T_r)$, yang lebih banyak dimanfaatkan adalah pada $Z_c = 0,27$ (grafik pada Lampiran C1 dan C2).

Nilai Z juga dapat dicari dengan faktor asentrik. Postulasi Pitzer menyatakan bahwa *slope* dari kurva tekanan uap tereduksi adalah merupakan sifat yang paling sensitif terhadap dasar parameter ketiga. Karena tekanan uap dapat diukur dengan lebih akurat dibandingkan pengukuran terhadap sifat-sifat kritik, maka

pendekatan ini lebih bagus dari faktor kompresibilitas kritis Lydersen, *et al.* Pitzer mendefinisikan faktor asentrik (ω) sebagai:

$$\omega = -\log \left(\frac{P_r^{sat.}}{P_c} \right)_{T_r=0,7} - 1,0 \quad \dots(5.9)$$

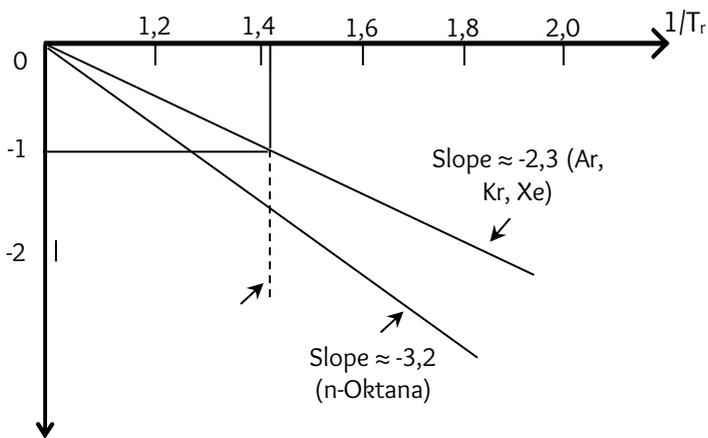
dengan $P_r^{sat.}$ adalah tekanan uap pada $T_r = 0,7$. Rasio antara $P_r^{sat.}$ terhadap P_c adalah merupakan tekanan uap tereduksi ($P_r^{sat.}$).

Evaluasi nilai $P_r^{sat.}$ pada $T_r = 0,7$ dipilih karena pada $T_r = 0,7$ tersebut, nilai ω dari gas-gas sederhana (Ar, Kr dan Xe) adalah nol. Ini berarti, berdasarkan persamaan (5.8), nilai $\log P_r^{sat.}$ pada $T_r = 0,7$ untuk gas-gas sederhana tersebut adalah sebesar -1. Visualisasi lebih jelas dari pernyataan terakhir, dapat dilihat pada Gambar 5.1.

Tiga parameter Pitzer yang berpengaruh terhadap nilai dari faktor kompresibilitas adalah P_r , T_r dan ω . Atau dinyatakan secara sederhana bahwa $Z = f(P_r, T_r, \omega)$. Rumusan lengkap persamaan Pitzer adalah sebagai berikut:

$$Z = Z^{(0)}(P_r, T_r) + \omega Z^{(1)}(P_r, T_r) \quad \dots(5.10)$$

$Z^{(0)}$ adalah faktor kompresibilitas untuk fluida sederhana, sedangkan $Z^{(1)}$ adalah pengkoreksi. Hubungan $Z^{(0)} = f(P_r, T_r)$ dan $Z^{(1)} = f(P_r, T_r)$ dapat dilihat pada Lampiran D.



Gambar 5.1. Pendekatan pengaruh suhu terhadap tekanan uap tereduksi

C.2. Persamaan keadaan analitik

Persamaan keadaan analitik merupakan persamaan keadaan yang diturunkan dengan memasukkan beberapa parameter ke dalam hukum gas ideal. Persamaan keadaan analitik telah diajukan dalam bentuk yang bervariasi dengan tingkat kompleksitas dan keakuratan masing-masing. Persamaan keadaan analitik dikatakan semakin teliti jika dapat menghasilkan nilai Z_c yang sesuai dengan nilai Z_c senyawa di alam, yang nilainya pada kisaran antara 0,20 sampai 0,30. Persamaan keadaan analitik sendiri dibagi ke dalam dua bentuk persamaan keadaan, yaitu: persamaan keadaan virial dan persamaan keadaan kubik.

Persamaan keadaan virial dibangun dengan asumsi dasar bahwa PV pada sepanjang proses isothermal dapat dinyatakan sebagai ekspansi seri dari pangkat (*power series expansion*). Ekspresi persamaan keadaan virial adalah sebagai berikut:

$$Z = \frac{P V_m}{R T} = 1 + \frac{B}{V_m} + \frac{C}{V_m^2} + \dots \quad \dots(5.11)$$

Atau jika dinyatakan dengan alternatif lain:

$$Z = \frac{P V_m}{R T} = 1 + B' P + C' P^2 + \dots \quad \dots(5.12)$$

dengan: $B' = B/RT$ dan $C' = (C - B^2)/R^2T^2$.

B, B', C, C', ..., dan seterusnya adalah koefisien virial yang nilainya hanya merupakan fungsi suhu, dan dihitung dari data PVT eksperimen.

Pada persamaan keadaan kubik, telah dikenal dalam berbagai bentuk, yang penamaannya biasanya direferensikan dengan nama yang mengajukannya. Bererapa persamaan keadaan kubik (dengan basis $n = 1$ mol gas) tersebut adalah:

- a. Persamaan keadaan **van der Waals**

$$\left(P + \frac{a}{V_m^2} \right) (V_m - b) = R T \quad \dots(5.13)$$

a dan b pada Persamaan (5.13) adalah konstanta-konstanta van der Waals.

a dan b merupakan karakteristik dari tiap gas. Nilai a dan b dapat dievaluasi dengan cara inspeksi di titik kritik. Pada

diagram P-V dengan parameter T, tampak bahwa kurva isothermal akan berbelok pada saat tepat melewati titik kritik. Berdasarkan prinsip diferensial, pada titik belok (titik stasioner), nilai turunan pertama dan kedua dari fungsi terhadap variabel bebasnya di titik belok tersebut adalah nol. Jika diambil kasus diagram P-V senyawa murni, maka di titik kritik berlaku hubungan berikut:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{T=T_c} = 0 \quad \text{dan} \quad \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)_{T=T_c} = 0$$

Untuk menggunakan kedua persamaan terakhir ini, Persamaan (5.13) harus dimodifikasi terlebih dahulu, sehingga diperoleh persamaan $P = f(V)$. Dengan inspeksi di titik kritik ini akan diperoleh rumusan a dan b dalam parameter P_c dan T_c adalah sebagai berikut:

$$a = \frac{27R^2T_c^2}{64P_c} \quad \text{dan} \quad b = \frac{RT_c}{8P_c}$$

Konstanta a dan b juga dapat dievaluasi dengan memanfaatkan data-data eksperimen PVT.

b. Persamaan keadaan **Redlich-Kwong**

$$P = \frac{R T}{V_m - b} - \frac{a}{T^{1/2} V_m (V_m + b)} \quad \dots(5.14)$$

Dengan cara yang sama seperti mencari rumusan konstanta van der Waals, akan diperoleh bahwa rumusan konstanta-konstanta Redlich-Kwong, a dan b, adalah:

$$a = \frac{0,4278R^2T_c^{2,5}}{P_c} \quad \text{dan} \quad b = \frac{0,0867RT_c}{P_c}$$

c. Persamaan keadaan **Redlich-Kwong-Soave**

$$P = \frac{R T}{V_m - b} - \frac{a \alpha}{V_m (V_m + b)} \quad \dots(5.15)$$

Rumusan konstanta a dan b pada persamaan ini, sama dengan rumusan konstan a dan b pada persamaan keadaan Redlich-Kwong, dengan pengecualian bahwa $T_c^{2,5}$ diganti dengan T_c^2 . Sedangkan $\alpha = f(T_r, \omega)$ adalah merupakan fungsi empirik yang diturunkan dari data tekanan uap senyawa hidrokarbon murni. Soave menetapkan bahwa korelasi antara α dengan T_r dan ω adalah sebagai berikut:

$$\alpha = \left[1 + S \left(1 - \sqrt{T_r} \right) \right]^2$$

dengan $S = a' + b'\omega + c'\omega^2$, dengan a' , b' dan c' adalah konstanta.

Graboski dan Daubert (1978) berhasil menemukan konstanta korelasi Soave a' , b' dan c' , sehingga rumusan S menjadi:

$$S = 0,48508 + 1,55171\omega - 0,15613\omega^2$$

Nilai ω , faktor asentrik, dievaluasi pada $T_r = 0,7$, seperti pada Persamaan (5.9).

d. Persamaan keadaan **Peng-Robinson**

$$P = \frac{R T}{V_m - b} - \frac{a \alpha}{V_m (V_m + b) + b (V_m - b)} \quad \dots(5.16)$$

Dengan:

$$a = \frac{0,45724 R^2 T_C^2}{P_C} \quad \text{dan} \quad b = \frac{0,0778 R T_C}{P_C}$$

$$\alpha = \left[1 + \zeta \left(1 - \sqrt{T_r} \right) \right]^2$$

$$S = 0,37464 + 1,54226\omega - 0,26992\omega^2$$

D. Persamaan Keadaan pada Fluida Cair

Pendekatan yang digunakan untuk menurunkan persamaan keadaan yang berlaku untuk fluida cair, berlaku juga untuk jenis fluida lainnya. Pendekatan tersebut menyatakan bahwa volum spesifik atau densitas dari senyawa murni pada kondisi fasa tunggal bergantung atau merupakan fungsi dari suhu dan tekanan. Pernyataan ini secara matematik dapat dituliskan sebagai:

$$v = f(T, P) \quad \dots(5.17a)$$

Diferensiasi total dari v pada Persamaan (5.17a) didefinisikan sebagai:

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T dP \quad \dots(5.17b)$$

Jika pada masing-masing ruas dari Persamaan (5.17b) dibagi dengan v , akan diperoleh:

$$\frac{1}{v} dv = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dT + \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T dP \quad \dots(5.17c)$$

Pada Persamaan (5.17c) akan dapat dimunculkan dua sifat milik yang pada umumnya direferensikan untuk fluida cair. Dua sifat milik tersebut adalah β (koefisien ekspansivitas volume atau termal) dan κ (koefisien kompresibilitas isotermal), dimana masing-masing didefinisikan sebagai:

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \quad \text{dan} \quad \kappa = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T \quad \dots(5.17d)$$

Substitusi Persamaan (5.17d) ke dalam Persamaan (5.17c) akan diperoleh:

$$\frac{1}{v} dv = \beta dT - \kappa dP \quad \dots(5.18)$$

atau jika dinyatakan dalam bentuk hubungan pengaruh perubahan suhu dan perubahan tekanan terhadap densitas, Persamaan (5.18) akan menjadi:

$$-\frac{1}{\rho} d\rho = \beta dT - \kappa dP \quad \dots(5.19)$$

Persamaan (5.18) dan (5.19) tersebut merupakan persamaan keadaan yang berlaku untuk fluida cair.

Evaluasi Bab 5

(Soal-Penyelesaian dan Soal Latihan)

A. Soal dan Penyelesaian

1. For ammonia at 100 °C and 10 bar pressure, calculate its molar specific volume by using: (a) the van der Waals equation; (b) Redlich-Kwong-Soave equation

Penyelesaian:

Penyelesaian akan dibawa ke dalam sistem Satuan Internasional (SI), sehingga semua sifat termodinamika harus dibawa ke sistem satuan ini.

Dalam sistem SI: Nilai dari $R = 8314,3 \text{ kJ}/(\text{kmolK})$ atau:

$$R = 8314,3 \text{ Pam}^3/(\text{kmolK})$$

$$P_{\text{amonia}} = 10 \text{ bar} = 10^6 \text{ Pa} \text{ dan } T_{\text{amonia}} = 100 \text{ }^\circ\text{C} = 373,1 \text{ K}$$

Tekanan dan suhu kritik ammonia (dapat dilihat di literatur):

$$T_C = 405,5 \text{ K} \text{ dan } P_C = 11,28 \text{ MPa} = 11,28 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Persamaan van der Waals

Konstanta van der Waals:

$$a = = = 425116$$

$$b = = = 0,03736$$

Dengan Persamaan (5.12) diperoleh:

$$(V_m - 0,03736) = (8314,3)(373,1) \dots(5.12i)$$

Jika digunakan persamaan keadaan **gas ideal**, diperoleh bahwa: $V_m = 3,10 \text{ m}^3/\text{kmol}$. Dengan mengacu pada nilai tersebut, dilakukan *trial and error*.

Akan diperoleh bahwa dengan mencoba meng-*input* nilai $V_m = 3,0 \text{ m}^3/\text{kmol}$, masing-masing ruas pada Persamaan (5.12i) adalah: $3102581 = 3102065$ (**sudah cukup konvergen**).

Jadi volume molar amonia pada 10 bar dan 100 °C adalah sebesar $V_m = 3,0 \text{ m}^3/\text{kmol}$.

b. Persamaan Redlich-Kwong-Soave

Konstanta Redlich-Kwong-Soave:

$$a = = 431087$$

$$b = 0,0867 = 0,0867 = 0,02591$$

Pada Persamaan (5.14) terdapat parameter α . Nilai α dicari dengan persamaan:

$$\alpha = \sqrt{1 + \frac{2.77464 T_r}{T_r - 1.76355}}$$

dengan $S = 0,48508 + 1,55171 - 0,15613^2$

Dari literatur diperoleh bahwa nilai faktor asentrik (a_1) amonia adalah 0,2515, sehingga:

$$S = 0,48508 + 1,55171(0,2515) - 0,15613 (0,2515)^2 = 0,86546$$

$$T_r = = 0,91965$$

$$\alpha = \sqrt{1 + \frac{2.77464 T_r}{T_r - 1.76355}} = 1,0355$$

Dengan memasukkan semua nilai yang diperlukan ke dalam persamaan Redlich-Kwong-Soave, persamaan, Persamaan (5.14), diperoleh:

$$10^6 = - \dots(5.14i)$$

Dengan *trail and error* diperoleh bahwa volume molar dari amonia pada 10 bar dan 100 °C, kira-kira adalah sebesar V_m adalah **2,98 m³/kmol**.

2. To what pressure must water be compressed at 50 °C to change its density by 1%? Assume that α is independent of P.

For water at 50 °C and 1 bar, $\alpha = 44,18 \times 10^{-6} \text{ bar}^{-1}$.

Penyelesaian:

Proses kompresi yang dilakukan berlangsung pada suhu tetap (50 °C). Fluida yang digunakan berupa cairan.

Kasus berupa evaluasi pengaruh perubahan tekanan terhadap densitas fluida cair.

Dengan menggunakan Persamaan (5.16), kasus ini dapat diselesaikan sebagai berikut:

...(5.18)

Karena proses kompresi dilakukan secara isothermal, maka nilai $dT = 0$. Diasumsikan bahwa ρ independent terhadap P . Sehingga dengan demikian, integral terhadap Persamaan (5.16) akan diperoleh:

$$\ln = -K (P_2 - P_1)$$

Sedangkan $\rho = 1/p$, sehingga persamaan terakhir dapat diubah menjadi:

$$\ln = -K (P_2 - P_1) \dots(5.16i)$$

Diinginkan densitas air berubah sebesar 1%, sehingga hubungan antara P_1 dan P_2 adalah:

$$\% \Delta \rho = x \ 100\%$$

Diketahui $\% \Delta \rho = 1\%$, maka akan diperoleh bahwa:

$$\rho_2 = 1,01 \rho_1$$

Dengan memasukkan semua nilai yang diperlukan ke dalam Persamaan (5.16i) akan diperoleh:

$$\ln = -44,18 \times 10^6 (P_2 - 1)$$

Dieroleh $P_2 = 226,2 \text{ bar}$.

Tampak bahwa untuk mengubah densitas air sebesar 1% saja, tekanan air harus dinaikkan sebesar 226,2 kali lipat. Perubahan tekanan yang sangat besar tidak berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan densitas fluida. Fluida seperti ini dikenal sebagai **fluida inkompresibel**.

B. Soal Latihan

1. Gas karbon dioksida sebanyak 8 kg disimpan di dalam sebuah tangki penyimpanan pada tekanan 80 atm dan suhu 30 °C. Perkirakan berapa volum minimal tangki yang dibutuhkan, jika gas karbon dioksida pada kondisi tersebut berkelakuan sebagai gas van der Waals.

(Jawaban: Volum tangki penyimpanan = 17,6 liter)

2. Hitunglah W , Q , ΔU dan ΔH ketika 1 kg cairan karbon tetraklorida dipanaskan dari 0 °C menjadi 50 °C pada tekanan 1 bar! Koefisien ekspansivitas termal karbon tetraklorida adalah $0,0012 \text{ K}^{-1}$, densitas pada 0 °C adalah 1590 kg m^{-3} dan kapasitas panas spesifik C_p adalah $0,84 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

(Jawaban: $W = -3,8 \text{ J/kg}$, $Q = 42 \text{ kJ/kg}$, $\Delta U \approx 42 \text{ kJ/kg}$, $\Delta H = 42 \text{ kJ/kg}$)

3. Tentukan nilai z (*compressibility factor*) and V (*specific volume*, dalam $\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$) untuk uap air pada 250 °C dan 18 bar, menggunakan persamaan keadaan van der Waals dan *steam table*.

(Jawaban: van der waals: $V = 0,119 \text{ m}^3/\text{kg}$, $Z = 0,89$; dengan steam table: $V = 0,1249 \text{ m}^3/\text{kg}$, $Z = 0,93$)

4. Pada kondisi suhu 200 °C dan tekanan tertentu, diketahui bahwa densitas isopropanol ($\text{CH}_3\text{CHOHCH}_3$) adalah $0,0175 \text{ gram/cm}^3$. Tentukan besarnya tekanan isopropanol (dalam bar) pada kondisi tersebut dengan menggunakan:

- a. Persamaan keadaan gas ideal
- b. Persamaan keadaan virial (koefisien virial: $B = -88 \text{ cm}^3/\text{mol}$ dan $C = -26000 \text{ cm}^6/\text{mol}^2$)
- c. Persamaan keadaan van der Waals ($P_c = 47,64 \text{ bar}$ dan $T_c = 235,3 \text{ °C}$)

(Jawaban: Gas ideal: $P = 11,47 \text{ bar}$; virial: $P = 10,15 \text{ bar}$; van der Waals: $P = 10,51 \text{ bar}$)

5. Koefisien kompresibilitas isothermal dari air diberikan dalam persamaan berikut:

$$\kappa = \frac{c}{v(P+b)},$$
 dimana b dan c hanya merupakan fungsi suhu.

Jika 1 kg air dikompresi secara isothermal dan reversibel pada suhu $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ di dalam suatu sistem tertutup, sehingga tekanannya berubah dari 1 bar menjadi 500 bar, hitunglah kerja yang dibutuhkan (dalam kJ) untuk keperluan tersebut!

Diketahui pada suhu $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, nilai $b = 2700\text{ bar}$ dan $c = 0,125\text{ cm}^3\text{ g}^{-1}$. (**Jawaban:** $W = 0,52\text{ kJ}$)

VI. HUKUM I TERMODINAMIKA

A. Pengantar

Kondisi suatu sistem (materi kerja) ditentukan oleh sifat-sifat termodinamika yang dimiliki oleh sistem tersebut. Ketika satu atau lebih sifat termodinamika dari suatu sistem mengalami perubahan, maka hal tersebut juga akan menyebabkan perubahan pada kondisi sistem. Oleh karena itu sifat termodinamika sering dikenal sebagai variabel/peubah kondisi sistem. Perubahan kondisi sistem tersebut terjadi akibat sistem dikenai suatu proses termodinamika.

Perubahan yang dialami oleh sistem dapat berupa perubahan tunggal, dan sering pula perubahan terjadi dalam beberapa seri langkah terbuka atau tertutup. Perubahan yang terjadi dalam beberapa seri langkah tertutup dikenal sebagai perubahan siklik.

Pada jenis sistem tertutup (*closed system/ non-flow processes*) dan sistem terbuka (*opened system/ batch system/ flow processes*), perubahan pada kondisi atau sifat termodinamika dari sistem akan diiringi oleh keterlibatan berbagai bentuk energi. Mengenai bentuk-bentuk energi sendiri telah dibahas pada Bab 3 tentang Kerja, Energi dan Panas.

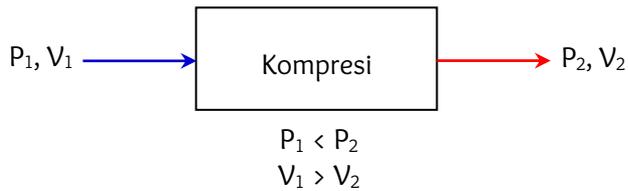
B. Definisi dan Jenis-Jenis Proses Termodinamika

Pada bagian sebelumnya telah diuraikan bahwa sistem yang mendapatkan perlakuan proses termodinamika akan mengalami perubahan dalam sifat-sifat (*properties*) atau keadaan/kondisinya. Dikenal banyak jenis proses termodinamika yang terlibat dalam perubahan sifat-sifat atau keadaan sistem. Jenis-jenis proses termodinamika tersebut secara garis besar dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan kekonstanan nilai dari suatu sifat termodinamika selama proses berlangsung
 - a. **Isotermal**, proses yang dilangsungkan pada suhu konstan ($\Delta T = 0$)
 - b. **Isobar**, proses yang dilangsungkan pada tekanan konstan ($\Delta P = 0$)
 - c. **Isovolum/isometrik/isokhorik**, proses yang dilangsungkan pada volum konstan ($\Delta V = 0$)
 - d. **Adiabatik**, selama proses berlangsung tidak terjadi aliran atau perpindahan panas dari sistem ke lingkungan atau sebaliknya
 - e. **Non-adiabatik** dan **non-isotermal** (pada proses ini, P, V, T berubah dan ada aliran panas yang terlibat).
2. Berdasarkan perubahan tekanan dan volum sistem
 - a. **Kompresi**, proses yang akan mengakibatkan terjadinya peningkatan tekanan sistem, atau proses yang

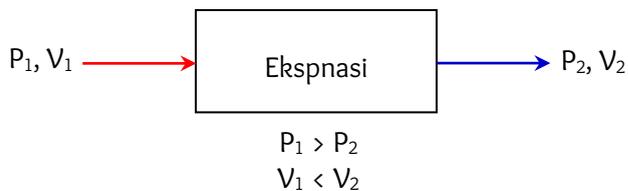
mengakibatkan penurunan volum/volum spesifik/volum spesifik molar sistem.

Alat mekanik: silinder berpiston (sistem tertutup), kompresor, pompa, nozzle, blower, jet ejetor (sistem terbuka)



b. **Ekspansi**, proses yang akan mengakibatkan terjadinya penurunan tekanan sistem, atau proses yang mengakibatkan peningkatan volum/volum spesifik/volum spesifik molar sistem.

Alat mekanik: Silinder berpiston (sistem tertutup), turbin (sistem terbuka)



3. Berdasarkan dapat/tidaknya suatu sistem dibawa kembali ke *initial state* dari *final state* (atau berdasar ada/tidaknya rugi-rugi mekanik)

a. **Proses reversibel**, proses dimana keadaan akhir dari sistem dapat dikembalikan ke keadaan awal tanpa mengubah keadaan sekelilingnya.

Dalam cakupan proses reversibel pada fenomena fisis, proses reversibel merupakan proses yang dilangsungkan dengan asumsi-asumsi sebagai berikut:

- Selama proses, perbedaan suhu antara sistem dengan lingkungan sangat kecil, sehingga perpindahan panas berlangsung sangat lambat
- Selama proses, perbedaan tekanan antara sistem dengan lingkungan sangat kecil, sehingga kerja yang dipindahkan sangat kecil
- Selama proses, tidak ada friksi/gesekan (tidak ada rugi-rugi gesek) antara sistem dengan bidang-bidang pembatas. Hal ini merupakan akibat dari dua asumsi sebelumnya.

b. **Proses ireversibel**, proses dimana keadaan akhir dari sistem tidak dapat dikembalikan ke keadaan awal, tanpa mengubah keadaan sekelilingnya.

Segala ketentuan pada proses ini berlawanan dengan ketentuan-ketentuan yang berlaku pada proses reversibel.

Antara proses reversibel dengan proses ireversibel dihubungkan dengan efisiensi mekanik, yang berupa efisiensi kompresi dan efisiensi ekspansi. Hubungan ini akan dibahas pada Bab 7 tentang Hukum II Termodinamika.

C. Neraca Energi

Neraca energi merupakan ekspresi matematik yang muncul dengan berdasar pada postulat bahwa energi di alam semesta adalah konstan. Hukum I Termodinamika adalah hukum kekekalan energi atau hukum konservasi energi, yang menyatakan bahwa:

Energi di alam semesta adalah konstan. Apabila energi tidak dijumpai dalam satu bentuk, maka pasti akan dijumpai dalam bentuk energi yang lain.

Suatu neraca energi umum didasarkan atas tiap satuan waktu yang dapat diset dan direduksi untuk sistem alir pada *steady* atau *non-steady*, dan untuk sistem *batch* atau sistem non alir. Neraca energi secara umum dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$(\text{energi masukan}) = (\text{energi keluaran}) + (\text{akumulasi energi})$$

Dengan melibatkan semua bentuk energi (kecuali energi permukaan/*surface energy*) seperti yang telah dibahas pada Bab 3, dapat diturunkan ekspresi Hukum I Termodinamika pada sistem tertutup dan sistem terbuka.

C.1. Neraca energi pada sistem tertutup (*closed system/ batch system/ non-flow processes*)

Pada tahap awal ditinjau semua jenis energi yang mungkin terlibat. Energi masukan dan energi keluaran (energi bersama aliran massa masuk dan keluar sistem), terdiri dari:

- a. Energi dalam (U)
- b. Energi potensial gravitasi (E_p)
- c. Energi kinetik (E_k)
- d. Energi tekan, PV

Sedangkan energi akumulasi dalam sistem terdiri dari: energi dalam, energi potensial gravitasi, dan energi kinetik. Bentuk energi lain yang terlibat adalah energi lewat bidang batas, yaitu panas (Q) dan kerja (W).

Berdasarkan atas satu satuan massa material, dan diambil kasus sistem menerima panas (Q) dan kerja (W) dari lingkungan, dengan memasukkan semua bentuk energi (energi masukan diberi simbol 1 dan energi keluaran 2) ke dalam ekspresi umum neraca energi, akan diperoleh persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \left(U_1 + \frac{g}{g_c} z_1 + \frac{1}{2g_c} v_1^2 + P_1 V_1 \right) - \left(U_2 + \frac{g}{g_c} z_2 + \frac{1}{2g_c} v_2^2 + P_2 V_2 \right) + \delta Q + \delta W \\ = d \left(U + \frac{g}{g_c} z + \frac{1}{2g_c} v^2 \right)_{\text{dalam sistem}} \end{aligned}$$

... (6.1)

Sedangkan, $H = U + PV$

Sehingga Persamaan (6.1) akan menjadi:

$$\left(H_1 + \frac{g}{g_c} z_1 + \frac{1}{2g_c} v_1^2 \right) - \left(H_2 + \frac{g}{g_c} z_2 + \frac{1}{2g_c} v_2^2 \right) + \delta Q + \delta W = d \left(U + \frac{g}{g_c} z + \frac{1}{2g_c} v^2 \right)_{\text{dalam sistem}} \dots(6.2)$$

atau jika dinyatakan dalam bentuk perubahannya, diperoleh persamaan:

$$-\Delta \left(H + \frac{g}{g_c} z + \frac{1}{2g_c} v^2 \right) + \delta Q + \delta W = d \left(U + \frac{g}{g_c} z + \frac{1}{2g_c} v^2 \right)_{\text{dalam sistem}}$$

atau,

$$\delta Q + \delta W = d \left(U + \frac{g}{g_c} z + \frac{1}{2g_c} v^2 \right) + \Delta \left(H + \frac{g}{g_c} z + \frac{1}{2g_c} v^2 \right) \dots(6.3)$$

Pada Persamaan (6.3), suku pertama dan kedua di ruas kanan, berturut-turut adalah perubahan energi di dalam sistem (akumulasi energi dalam sistem) dan perubahan energi dibawa/bersama aliran massa. Oleh karena sistem yang ditinjau adalah sistem tertutup (tidak ada aliran massa keluar maupun masuk sistem), maka tidak ada keterlibatan bentuk-bentuk energi yang terkelompok ke dalam bentuk energi dibawa/bersama aliran massa. Oleh karena itu, suku kedua ruas kanan dari Persamaan (6.3) bernilai nol. Akhirnya diperoleh persamaan berikut:

$$\delta Q + \delta W = d \left(U + \frac{g}{g_c} z + \frac{1}{2g_c} v^2 \right) \quad \dots (6.4)$$

Hasil integrasi terhadap kedua ruas dari Persamaan (6.4) diperoleh:

$$\delta Q + \delta W = \Delta \left(U + \frac{g}{g_c} z + \frac{1}{2g_c} v^2 \right) \quad \dots (6.5)$$

Persamaan (6.5) tersebut merupakan ekspresi Hukum I Termodinamika untuk sistem tertutup.

C.2. Neraca energi pada sistem terbuka (*opened system/ flow processes*)

Penurunan ekspresi Hukum I Termodinamika untuk sistem terbuka, dimulai dengan langkah-langkah yang sama seperti pada penurunan ekspresi Hukum I Termodinamika untuk sistem tertutup di atas. Uraian selanjutnya dimulai dari ekspresi matematik neraca energi yang ditampilkan pada Persamaan (6.3).

Apabila ditinjau suatu proses alir (sistem terbuka), maka suku kedua di ruas kanan akan mempunyai nilai. Dan jika diambil kasus bahwa pada proses alir yang ditinjau tersebut telah mencapai kondisi *steady state*, maka suku pertama di ruas kanan dari Persamaan (6.3) akan bernilai nol, tidak terdapat akumulasi energi di dalam sistem. Sehingga Persamaan (6.3) akan menjadi:

$$\delta Q + \delta W = \Delta \left(H + \frac{g}{g_c} z + \frac{1}{2g_c} v^2 \right) \quad \dots (6.6)$$

Atau jika dinyatakan dalam bentuk perubahan diferensialnya:

$$\delta Q + \delta W = d\left(H + \frac{g}{g_c}z + \frac{1}{2g_c}v^2\right) \dots(6.7)$$

Persamaan (6.6) dan (6.7) merupakan ekspresi Hukum I Termodinamika untuk sistem terbuka pada kondisi *steady state*.

D. Kapasitas Panas

Kapasitas panas telah disinggung dengan cukup lengkap pada Bab 3 tentang Kerja, Energi dan Panas. Pada bab tersebut dinyatakan bahwa kapasitas panas terdapat dalam dua bentuk, yaitu kapasitas panas pada tekanan konstan (C_p) dan kapasitas panas pada volum konstan (C_v). Rumusan dari kedua bentuk kapasitas panas tersebut telah disampaikan pada Bab 3, yaitu sebagai berikut:

$$C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT}\right)_p \quad \text{dan} \quad C_v = \left(\frac{\delta Q}{dT}\right)_v$$

Kedua rumusan tersebut berlaku umum, baik untuk sistem tertutup ataupun terbuka, baik fluida cair, gas ataupun padatan, dan baik gas ideal ataupun tidak ideal.

Pada sub bab ini akan diuraikan ekspresi matematik yang lain dari C_p dan C_v dengan memanfaatkan Hukum I Termodinamika. Hukum I Termodinamika yang digunakan dapat yang berlaku untuk sistem tertutup ataupun sistem terbuka. Pada sub bab ini akan digunakan Hukum I Termodinamika untuk sistem tertutup. Uraian

pertama akan dilakukan terhadap kapasitas panas pada tekanan konstan (C_p).

$$C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p \quad \dots(6.8)$$

Hukum I Termodinamika untuk sistem tertutup pada pemanasan terhadap materi kerja (dengan asumsi $\Delta E_p = \Delta E_k = 0$), adalah:

$$Q + W = \Delta U \quad \text{atau} \quad \delta Q + \delta W = dU$$

dimana: $\delta W = -P dV$ dan $dH = dU + PdV + VdP$

Sehingga Hukum I Termodinamika pada sistem tertutup akan termodifikasi menjadi:

$$\delta Q - PdV = dH - PdV - VdP \quad \text{atau,} \quad \delta Q = dH - VdP \quad \dots(6.9)$$

Proses dilakukan pada tekanan konstan ($dP = 0$), sehingga Persamaan (6.9) menjadi:

$$(\delta Q)_p = dH \quad \dots(6.10)$$

Substitusi Persamaan (6.10) ke Persamaan (6.8), diperoleh:

$$C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p = \left(\frac{dH}{dT} \right)_p \quad \dots(6.11)$$

Dengan cara serupa, melalui penyesuaian jenis proses termodinamika, akan didapatkan bahwa kapasitas panas pada volum konstan (C_V) dapat dinyatakan dengan rumusan berikut:

$$C_V = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_{VP} = \left(\frac{dU}{dT} \right)_P \quad \dots(6.12)$$

E. Hubungan C_P , C_V dan R pada Gas Ideal

Hubungan dasar pada entalpi diberikan oleh Persamaan (3.1). Untuk 1 mol sistem, entalpi dapat dirumuskan dengan:

$$H = U + PV$$

atau jika dinyatakan dalam bentuk perubahan diferensialnya, Persamaan (3.1) menjadi:

$$dH = dU + d(PV) \quad \dots(3.1a)$$

Persamaan keadaan gas ideal, Persamaan (5.1), untuk gas sebanyak 1 mol adalah:

$$PV = RT \quad \dots(5.1a)$$

Untuk gas ideal, apapun proses termodinamika yang dikenakan terhadap gas ideal, dH dan dU masing-masing dirumuskan sebagai berikut:

$$dH = C_P dT \quad \text{dan} \quad dU = C_V dT \quad \dots (6.13) \text{ dan } (6.14)$$

Tentang pernyataan perubahan entalpi dan perubahan energi dalam pada gas ideal tersebut di atas, akan dibahas dan dibuktikan pada Bab 8 tentang Hubungan antar Besaran Termodinamika.

Substitusi Persamaan (5.1a), (6.13) dan (6.14) ke Persamaan (3.1a), akan diperoleh hubungan berikut:

$$C_p dT = C_v dT + d(RT)$$

R adalah konstanta, sehingga dapat dikeluarkan dari tanda diferensial. Dengan mengeliminasi perubahan suhu (dT), persamaan terakhir di atas akan menjadi:

$$C_p = C_v + R \quad \dots(6.15)$$

Persamaan (5.15) merupakan persamaan hubungan antara $C_p = C_v + R$ yang berlaku jika materi kerjanya adalah gas ideal.

F. Evaluasi Berbagai Proses Termodinamika dengan Hukum I Termodinamika

Pada sub bab ini akan dibahas penerapan Hukum I Termodinamika untuk mengevaluasi keterlibatan berbagai bentuk energi dan ekspresi matematikanya, jika suatu sistem mengalami perubahan keadaan akibat dikenai proses termodinamika tertentu. Untuk menyederhanakan kasus, pada evaluasi berbagai proses termodinamika ini, diambil pembatasan-pembatasan sebagai berikut:

- a. Materi kerja (sistem) yang digunakan adalah gas ideal
- b. Proses dilakukan dalam sistem tertutup
- c. Perubahan energi potensial gravitasi dan energi kinetik sangat kecil (dapat diabaikan)
- d. Proses berlangsung secara reversibel

Dengan pembatas-pembatas tersebut, evaluasi berbagai proses termodinamika (untuk materi kerja sebanyak 1 mol) adalah sebagai berikut:

a. Proses **Isobar**

- Penurunan rumusan ΔH

Hukum I Termodinamika: $dU = \delta Q + \delta W$

Rumus dasar kerja: $\delta W = -P dV$, maka:

Hukum I Termodinamika menjadi: $\delta Q + \delta W = dU$

dimana: $\delta W = -P dV$ dan $dH = dU + PdV + VdP$

Sehingga Hukum I Termodinamika pada sistem tertutup akan termodifikasi menjadi:

$$\delta Q - PdV = dH - PdV - VdP \quad \text{atau,} \quad \delta Q = dH - VdP$$

Proses dilakukan pada tekanan konstan ($dP = 0$), sehingga persamaan perubahan entalpi menjadi:

$$dH = (\delta Q)_p \quad \dots(i)$$

Hasil integrasi persamaan terakhir, diperoleh:

$$\Delta H = Q \quad \dots(ii)$$

Sedangkan per definisi: $C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p$ atau $\delta Q = C_p dT$

Setelah diintegrasikan, diperoleh: $Q = \int_1^2 C_p dT$. Sehingga pada proses isobar, berlaku hubungan:

$$\Delta H = Q = \int_1^2 C_p dT$$

- Penurunan rumusan ΔU

Hukum I Termodinamika untuk sistem tertutup:

$$dU = \delta Q - PdV$$

Karena P tetap (proses isobar), maka P dapat masuk ke dalam tanda differensial. Sehingga Hukum I Termodinamika menjadi:

$$dU = \delta Q - dPV \quad \dots(i)$$

Proses isobar: $\delta Q = C_p dT \quad \dots(ii)$

$$\dots(ii)$$

Gas ideal: $PV = RT \quad \dots(iii)$

$$\dots(iii)$$

Substitusi Persamaan (ii) dan (iii) ke Persamaan (i) akan diperoleh:

$$dU = C_p dT - d(RT) \quad \text{atau} \quad dU = C_p dT - RdT \quad \dots(iv)$$

Pengaturan kembali Persamaan (iv) akan didapat:

$$dU = (C_p - R) dT \quad \dots(v)$$

Dari hubungan C_p dan C_v pada gas ideal, berlaku:

$(C_p - R) = C_v$, sehingga diperoleh:

$$dU = C_v dT \quad \text{atau} \quad \Delta U = \int_1^2 C_v dT$$

- Penurunan rumusan Q

Dari analisa sebelumnya, diperoleh hubungan:

$$Q = \Delta H = \int_1^2 C_p dT$$

- Penurunan rumusan W

W dapat dicari dari Hukum I Termodinamika, dimana untuk sistem tertutup diekspresikan sebagai:

$$\Delta U = Q + W.$$

Atau, dapat dicari dengan menggunakan rumusan umum kerja reversibel, dimana untuk sistem tertutup dirumuskan

sebagai:
$$W_{\text{rev}} = - \int_1^2 P dV .$$

b. Proses **isovolum/isometrik/isokorik**

- Penurunan rumusan ΔU

Hukum I Termodinamika: $dU = \delta Q + \delta W$

Rumus dasar kerja: $\delta W = - PdV$, maka untuk V tetap diperoleh hubungn: $dU = \delta Q_V \dots(i)$

Per definisi: $C_V = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V$; sehingga diperoleh:

$$\delta Q_V = C_V dT \dots(ii)$$

Persamaan (ii) disubstitusi ke Persamaan (i):

$dU = \delta Q_V = C_V dT$ atau jika diintegrasikan akan diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$\Delta U = Q = \int_1^2 C_V dT$$

- Penurunan rumusan ΔH

Definisi H setelah dinyatakan dalam bentuk diferensial:

$$dH = dU + PdV + VdP$$

Untuk proses pada V konstan, maka diperoleh:

$$dH = dU + VdP$$

Karena V tetap, V dapat masuk ke diferensial. Persamaan menjadi:

$$dH = dU + dVP \dots(i)$$

Proses isovolum: $dU = C_V dT \dots(ii)$

$\dots(ii)$

Gas ideal: $PV = RT \dots(iii)$

Substitusi Persamaan (ii) dan (iii) ke Persamaan (i) akan diperoleh:

$$dH = C_v dT + d(RT) \quad \text{atau,} \quad dH = C_v dT + R dT \quad \dots(\text{iv})$$

Pengaturan kembali Persamaan (iv) akan diperoleh:

$$dH = (C_v + R) dT$$

Dari hubungan C_p dan C_v pada gas ideal:

$(C_v + R) = C_p$. Oleh karena itu akan diperoleh:

$$dH = C_p dT \quad \text{atau,} \quad \Delta H = \int_1^2 C_p dT$$

- Penurunan rumusan Q

Dari tahap penurunan sebelumnya, diperoleh hubungan:

$$Q = \Delta U = \int_1^2 C_v dT$$

- Penurunan rumusan W

$$W_{\text{rev}} = -\int_1^2 P dV \quad ; \quad \text{pada proses isovolum, } dV = 0, \text{ sehingga:}$$

$$W_{\text{rev}} = 0$$

c. Proses **isotermal**

- Berdasarkan analisis rumusan ΔH dan ΔU pada proses sebelumnya (isobar dan isovolum), menunjukkan bahwa untuk gas ideal, apapun prosesnya,

$$\Delta H = \int_1^2 C_p dT \quad \text{dan} \quad \Delta U = \int_1^2 C_v dT$$

Pada proses isotermal ($dT = 0$), maka: $\Delta H = \Delta U = 0$

- Penurunan rumusan Q

Hukum I Termodinamika untuk sistem tertutup diekspresikan sebagai:

$\Delta U = Q + W$. Pada proses isotermal, dengan $\Delta U = 0$, diperoleh: $Q = -W$.

- Penurunan rumusan W

$$W_{\text{rev}} = -\int_1^2 P dV, \quad \text{sedangkan untuk gas ideal:} \quad P = \frac{RT}{V}$$

Sehingga: $W_{\text{rev}} = -\int_1^2 \frac{RT}{V} dV$. Untuk proses isotermal,

selama proses berlangsung, suhu sistem/materi kerja bernilai tetap ($T_1 = T_2 = T$). Akhirnya akan diperoleh:

$$W_{\text{rev}} = -RT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad \text{atau,} \quad W_{\text{rev}} = +RT \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

d. Proses **Adiabatik**

- Penurunan rumusan ΔH

$$\Delta H = \int_1^2 C_p \, dT$$

Untuk gas ideal,

- Penurunan rumusan ΔU

$$\Delta U = \int_1^2 C_v \, dT$$

Untuk gas ideal,

- Penurunan rumusan Q

Proses adiabatik reversibel, $Q = 0$

- Penurunan rumusan W

Hukum I Termodinamika: $\Delta U = Q + W$.

Untuk $Q = 0$, maka $W = \Delta U$ atau
$$W = \int_1^2 C_v \, dT$$
.

$$W_{\text{rev}} = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

Atau,

Pada proses adiabatik dengan materi kerja atau sstem berupa gas ideal, berlaku hubungan antara P , V dan T sebagai berikut berikut:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \quad (\text{hubungan } P-V)$$

$$V_1^{\gamma-1}T_1 = V_2^{\gamma-1}T_2 \quad (\text{hubungan } V - T)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (\text{hubungan } P - T)$$

dengan γ adalah tetapan Laplace $\left(\gamma = \frac{C_p}{C_v}\right)$

e. Proses **Politropik**

Analisis pada proses politropik sama dengan pada proses adiabatik. Perbedaannya bahwa pada proses politropik digunakan parameter k sebagai pengganti γ . Hal tersebut untuk memfasilitasi fakta bahwa:

$$k \neq \frac{C_p}{C_v}$$

Kenyataan ini menginformasikan bahwa proses politropik merupakan proses adiabatik dengan menggunakan gas non-ideal. Nilai k pada proses politropik harus ditentukan berdasarkan data eksperimen.

G. Panas Reaksi Kimia

Ditinjau dari segi efek panas, reaksi kimia ada yang termasuk sebagai reaksi eksoterm dan ada yang termasuk reaksi endoterm. Pada reaksi eksoterm, sejumlah panas dilepaskan oleh sistem reaksi. Sedangkan pada reaksi endoterm, sistem reaksi harus menerima sejumlah panas agar sistem reaksi endoterm dapat berlangsung.

Panas reaksi secara umum didefinisikan sebagai panas yang menyertai keberlangsungan suatu sistem reaksi kimia. Seperti penjelasan sebelumnya, kesertaan panas pada reaksi kimia, ada yang berupa pelepasan panas dari sistem reaksi atau penyerapan panas oleh sistem reaksi. Ke-adiabatik-an pada sistem reaksi kimia bukan berarti bahwa pada suatu sistem reaksi kimia tidak melibatkan efek panas ini. Jadi dapat dikatakan bahwa panas reaksi merupakan sifat milik dari suatu sistem reaksi.

Berdasarkan Hukum I Termodinamika untuk proses alir dengan mengabaikan perubahan energi kinetik dan energi potensial dan tidak ada kerja mekanik eksternal, sedangkan untuk proses non-alir yang dioperasikan pada tekanan konstan, diperoleh bahwa $Q = \Delta H$. Analisa ini yang menjadi dasar umum bahwa kuantitas panas yang menyertai reaksi kimia sama dengan perubahan entalpi dari reaksi tersebut.

Panas reaksi standar (ΔH_R°) adalah panas reaksi kimia yang nilainya merupakan selisih antara total panas pembentukan dari komponen produk reaksi terhadap total panas pembentukan dari komponen reaktan pada tekanan 1 atm dan suhu 25 °C. Oleh karena itu panas reaksi standar dirumuskan sebagai berikut:

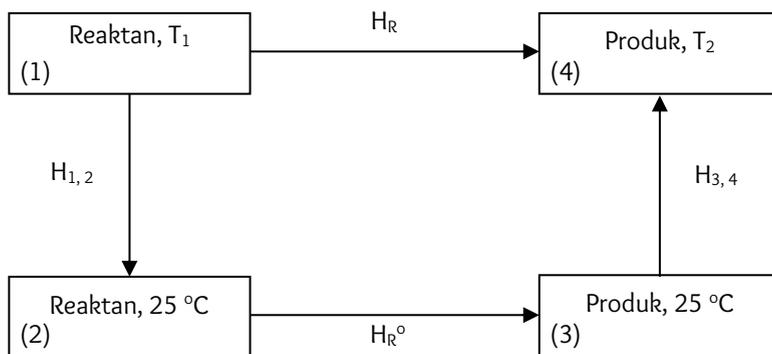
$$\Delta H_R^\circ = \left(\sum n \Delta H_f^\circ \right)_{\text{produk}} - \left(\sum n \Delta H_f^\circ \right)_{\text{reaktan}} \quad \dots (6.16)$$

dengan ΔH_f° adalah panas pembentukan standar dan n adalah jumlah mol stokiometri dari tiap komponen yang terlibat dalam

reaksi (reaktan dan produk reaksi). Data panas pembentukan standar dari sebagian besar substansi kimia telah tersedia di banyak literatur yang terkait.

Kemudian, perjanjian termodinamika menyatakan bahwa jika perubahan entalpi reaksi bertanda negatif (-), maka reaksi tersebut adalah reaksi eksoterm. Dan jika perubahan entalpi reaksi bertanda positif (+), maka reaksi tersebut merupakan reaksi endoterm.

Pada reaksi-reaksi aktual/nyata, sering reaksi kimia tidak hanya dilangsungkan pada suhu 25 °C. Untuk menghitung panas reaksi (ΔH_R) pada kasus reaksi seperti ini, dikembalikan pada konsep bahwa perubahan entalpi merupakan fungsi keadaan, sehingga antara suhu aktual reaktan dan suhu aktual produk dapat dihubungkan dengan suhu standar. Pernyataan terakhir ini diilustrasikan pada Gambar 6.1 berikut:



Gambar 6.1. Diagram reaksi untuk perhitungan panas reaksi

Rumusan perhitungan:

$$\Delta H_R = \Delta H_{1,2} + \Delta H_R^\circ + \Delta H_{3,4} \quad \dots(6.17)$$

dengan: $\Delta H_{1,2} = \int_{T_1}^{298 \text{ K}} C_{p, \text{reaktan}} dT$ dan,

$$\Delta H_{3,4} = \int_{298 \text{ K}}^{T_2} C_{p, \text{produk}} dT$$

Evaluasi Bab 6 (Soal-Penyelesaian dan Soal Latihan)

A. Soal dan Penyelesaian

1. One mole of air, initially at 150 °C and 8 bar, undergoes the following mechanically reversible changes in a closed system. It expands isothermally to a pressure such that when it is cooled at constant volume to 50 °C its final pressure is 3 bar. Assuming that air is an ideal gas for $C_p = (7/2)R$ dan $C_v = (5/2)R$. Calculate W , Q , U and H !

Penyelesaian:

Analisis kasus:

Jumlah udara, $n = 1$ mol

Udara berkelakuan sebagai gas ideal, dengan C_p dan C_v tetap

Proses perubahan dilangsungkan dalam sistem tertutup

Perubahan energi potensial dan energi kinetik dapat diabaikan.

Dari ilustrasi soal, menunjukkan bahwa udara mengalami dua seri langkah perlakuan proses termodinamika. Untuk jelasnya, kedua proses tersebut digambarkan terlebih dahulu pada diagram P-V.

Ditinjau **Langkah 2 (b ke c): Pendinginan isovolume.**

Untuk gas ideal yang mengalami proses isovolum, berlaku hubungan:

= , sehingga: $P_b = \frac{1}{3} P_a = 3,93 \text{ bar}$

Pada proses isovolume dan sistem tertutup, berlaku:

$$W_{b-c} = 0, Q_{b-c} = U_{b-c}$$

$Q_{b-c} = \Delta U_{b-c} = n C_V \Delta T$. Untuk C_V tetap, maka:

$$Q_{b-c} = \Delta U_{b-c} = 1 \text{ mol} \times 8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K} \times (50 - 150) \text{ K}$$

$$Q_{b-c} = \Delta U_{b-c} = -2078,5 \text{ J.}$$

Sedangkan untuk gas ideal, apapun prosesnya dan dengan C_p konstan, perubahan entalpinya adalah:

$\Delta H = n \cdot C_p \cdot \Delta T$, sehingga:

$$\Delta H_{b-c} = 1 \text{ mol} \times 8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K} \times (50 - 150) \text{ K} = 2909,9 \text{ J}$$

Ditinjau **Langkah 1 (a ke b): Ekspansi isothermal.**

Untuk gas ideal yang mengalami proses isothermal dari keadaan a (150 °C, 8 bar) menjadi b (50 °C, 3,93 bar), nilai-nilai dari W , Q , U dan H nya dapat dihitung sebagai berikut:

$$W_{a-b} = + n R T \ln \frac{P_b}{P_a}$$

$$W_{a-b} = +1 \text{ mol} \times 8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K} \times (150 - 273) \text{ K} = -2499,76 \text{ J}$$

$$\Delta U_{a-b} = H_{a-b} = 0$$

Selanjutnya dapat dihitung: $Q_{a-b} = -W_{a-b} = +2499,76 \text{ J.}$

Nilai total dari W , Q , U dan H masing-masing adalah:

$$W_{\text{total}} = -2499,76 \text{ J}; Q_{\text{total}} = 421,26 \text{ J};$$

$$U_{\text{total}} = -2078,5 \text{ J}; H_{\text{total}} = -2909,9 \text{ J.}$$

Pada sistem tertutup, nampak bahwa: $W_{\text{total}} + Q_{\text{total}} = U_{\text{total}}$.

2. A turbine is supplied with steam at a rate of 3 kg/s. The pressure and temperature inlet of steam into turbine are 6 bar and 350 °C. Steam coming out from the turbine is in wet condition with a pressure of 2.5 bar and a quality of 80%. If the heat loss rate during the operation of the turbine is 720 kW, what is the output power of the turbine in kW?

Penyelesaian:

Kasus berupa ekspansi pada sebuah turbin, dengan benda kerja berupa uap air. Akibat terjadinya ekspansi dari benda kerja, dihasilkan sejumlah energi/kerja mekanik.

Pada penyelesaian kasus ini, untuk mengetahui nilai dari properties benda kerja (berupa uap air), digunakan **Steam Table**.

Ilustrasi proses ekspansi:

Berdasarkan analisis kondisi uap, uap air masuk turbin pada kondisi *superheated* (pada $P = 6 \text{ bar} = 600 \text{ kPa}$, $T_{\text{sat}} = 158,86 \text{ }^\circ\text{C}$, sehingga $T_1 > T_{1, \text{sat}}$). Dengan *Superheated Table* pada $P_1 = 6 \text{ bar}$ (0,6 Mpa) dan $T_1 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ diperoleh:

$$h_1 = 3165,4 \text{ kJ/kg}$$

Uap air keluar turbin pada kondisi uap basah pada $P_2 = 2,5 \text{ bar}$ (250 kPa), dengan kualitas uap $x = 0,8$. Berdasarkan *Saturated Table* dengan parameter tekanan diperoleh data nilai-nilai entalpi pada tekanan tersebut sebagai berikut:

$$h_f = 535,50 \text{ kJ/kg} \text{ dan } h_g = 2716,8 \text{ kJ/kg}$$

Sehingga pada kualitas uap, $x = 0,8$ dapat dihitung nilai entalpi pada kondisi uap basah tersebut, sebesar:

$$h_2 = (1 - 0,8)535,5 + 0,8)2716,8 = 2280,54 \text{ kJ/kg}$$

Perubahan entalpi dari uap air karena ekspansi,

$$\Delta h = h_2 - h_1 = (2280,54 - 3164,4) \text{ kJ/kg} = -884,86 \text{ kJ/kg}$$

Untuk laju massa uap air sebesar 3 kg/s, diperoleh laju perubahan entalpi sebesar:

$$\Delta h = -884,86 \times 3 = -2654,58 \text{ kW}$$

Turbin merupakan salah jenis sistem terbuka, sehingga ekspresi persamaan Hukum I Termodinamika (dengan mengabaikan E_p dan E_k) untuk proses alir adalah:

$$\Delta h = W + Q \dots (i)$$

(Q = negatif, jika panas ditransfer dari sistem/materi kerja ke lingkungan)

Data:

$$\Delta h = -2654,58 \text{ kW dan } = -720 \text{ kW,}$$

sehingga diperoleh daya turbin sebesar:

$$W = \Delta h - Q = \text{kW} = -1934,58 \text{ kW}$$

W bertanda (-), artinya, sistem/materi kerja melepas kerja ke lingkungan (poros turbin).

B. Soal Latihan

1. 50 kg gas CO₂ yang suhunya 27 °C dan tekanannya 1 bar akan ditekan secara adiabatik dengan menggunakan kompresor *single stage* sehingga tekanannya menjadi 8 bar. Dengan mengambil asumsi bahwa gas CO₂ berkelakuan sebagai gas ideal di mana nilai $C_p = 1,304 C_v$ dan kompresi berlangsung secara reversibel, hitunglah:
 - a. Kerja minimum yang diperlukan
 - b. Temperatur akhir gas CO₂
 - c. Perubahan energi dalam dan perubahan entalpi gas CO₂(Jawaban: a. +7584,2 kJ; b. 214,1 °C; c. $\Delta U = 116,4$ kJ/kg dan $\Delta H = 151,8$ kJ/kg)
2. Pada suatu pembangkit listrik tenaga uap, uap air dengan kondisi 16 bar dan 250 °C diekspansikan dalam sebuah turbin adiabatik secara reversibel ($\Delta S = 0$, dengan S adalah entropi) sampai tekanannya menjadi 4 bar. Efisiensi pembangkitan listrik oleh generator sebesar 90%. Untuk keperluan pembangkitan listrik sebesar 1000 kWatt, perkirakan kebutuhan uap air minimal.
(Jawaban: $\dot{m}_{\text{uap air}} = 243,9$ kg/menit)
3. Uap air memasuki sebuah nozzle pada 10 bar dengan kecepatan 200 m/s dan keluar dari nozzle pada tekanan 1 bar dengan dipercepat menjadi 800 m/s. Jika panas yang lepas selama pengaliran uap air di dalam nozzle diabaikan, berapa perubahan entalpi per kilogram uap?
(Jawaban: $\Delta H = -600$ kJ kg⁻¹)
4. Satu kmol udara yang dapat diasumsikan sebagai gas ideal ($\gamma = 1,4$) mengalami perlakuan siklus reversibel dalam sistem tertutup melalui langkah-langkah berikut:
 - i. Dari kondisi awal $P = 8$ bar dan $T = 600$ K, udara didinginkan pada volum konstan
 - ii. Udara kemudian diekspansi secara isothermal sampai tekanannya menjadi 1 bar
 - iii. Pada langkah terakhir, dari langkah (ii), udara selanjutnya mengalami kompresi secara adiabatik sampai udara kembali ke kondisi semula (600 K dan 8 bar)

Gambarkan skets proses siklis yang dialami udara pada diagram P-V dengan parameter T, berapa panas dan kerja total yang terlibat pada siklus tersebut?

(Jawaban: $Q_{\text{total}} = -1493,79 \text{ kJ}$; $W_{\text{total}} = +1493,79 \text{ kJ}$)

5. Gas amonia yang terdapat dalam suatu silinder berpiston tanpa gesekan, mula-mula memiliki tekanan 40 psi dan volum spesifik 10 ft³/lb_m. Gas amonia tersebut dikompresi sampai 120 psi. Selama proses kompresi tersebut, terdapat hubungan:

$$P v^{0,91} = \text{konstan}$$

dengan P = tekanan (dalam psi) dan v = volum spesifik (dalam ft³/lb_m)

Tentukan kerja yang dipindahkan dan perubahan entalpi jika selama kompresi dilepaskan panas sebesar 800 Btu untuk setiap lb_m amonia.

6. Sebuah silinder berpiston tanpa gesekan diisi uap air jenuh (*saturated vapor*) pada tekanan 5 bar. Volum silinder adalah 750 liter. Uap air selanjutnya dikompresi sampai dicapai kondisi setimbang baru pada 187,99 °C dan 2 bar. Selama kompresi, panas sejumlah 2000 kJ dibuang ke lingkungan. Berapa persen uap air yang terkondensasi? Perkirakan kebutuhan kerja untuk kompresi! Hitung ΔH dan ΔU uap air.

(Jawaban: Fraksi terkondensasi = 52,20%; $W = 184,48 \text{ kJ}$; $\Delta H = -1000,8 \text{ kJ/kg}$; $\Delta U = -907,76 \text{ kJ/kg}$)

Daftar Pustaka

- Daubert, T. E. (1985). *Chemical Engineering Thermodynamics*. McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- Granet, I., Biuestein, M. (2000). *Thermodynamics and Heat Power*, 6th edition. Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Moran, M. J. (1999). *Engineering Thermodynamics*. CRS Press LLC, Boca Raton, Florida, USA.
- Sandler, S. I. (1999). *Chemical and Engineering Thermodynamics*, 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- Smith, J. M., van Ness, H. C., Abbott, M. M., Swihart, M. T. (2022). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, 9th edition. McGraw-Hill Book Company, New York, USA.

Lampiran

LAMPIRAN A (Faktor Konversi)

Kuantitas	Konversi
Panjang	1 m = 100 cm = 3,28084 (ft) = 39,370 (in)
Massa	1 kg = 10 ³ g = 2,20462 (lb _m)
Gaya	1 N = 1 kg m s ⁻² = 10 ⁵ (dyne) = 0,224809 (lb _f)
Tekanan	1 bar = 10 ⁵ kg m ⁻¹ s ⁻² = 10 ⁵ N m ⁻² = 10 ⁵ Pa = 100 kPa = 10 ⁶ (dyne) cm ⁻² = 0,986923 (atm) = 14,5038 (psia) = 750,061 (torr)
Volum	1 m ³ = 10 ⁶ cm ³ = 35,3147 (ft) ³ = 264,172 (gal)
Densitas	1 g cm ⁻³ = 10 ³ kg m ⁻³ = 62,4278 (lb _m)(ft) ⁻³
Energi	1 J = 1 kg m ² s ⁻² = 1 N m = 1 m ³ Pa = 10 ⁻³ m ³ bar = 10 cm ³ bar = 0,86923 cm ³ (atm) = 10 ⁷ (dyne) cm = 10 ⁷ (erg) = 0,239006 (cal) = 5,12197 x 10 ⁻³ (ft) ³ (psia) = 0,737562 (ft)(lb _f) = 9,47831 x 10 ⁻⁴ (Btu)
Tenaga	1 kW = 10 ³ W = 10 ³ kg m ² s ⁻³ = 10 ³ J s ⁻¹ = 239,006 (cal) s ⁻¹ = 737,562 (ft)(lb _f) s ⁻¹ = 0,947831 (Btu) s ⁻¹ = 1,34102 (hp)

Tabel A.2: Nilai Konstanta Gas Universal

$$\begin{aligned}
 R &= 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 8,314 \text{ m}^3 \text{ Pa mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\
 &= 83,14 \text{ cm}^3 \text{ bar mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 8314 \text{ cm}^3 \text{ kPa mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\
 &= 82,06 \text{ cm}^3 (\text{atm}) \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 62356 \text{ cm}^3 (\text{torr}) \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\
 &= 1,987 (\text{cal}) \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 1,986 (\text{Btu}) (\text{lbmol})^{-1} (\text{R})^{-1} \\
 &= 0,7302 (\text{ft})^3 (\text{atm}) (\text{lbmol})^{-1} (\text{R})^{-1} = 10,73 (\text{ft})^3 (\text{psia}) (\text{lbmol})^{-1} (\text{R})^{-1} \\
 &= 1545 (\text{ft}) (\text{lb}_f) (\text{lbmol})^{-1} (\text{R})^{-1}
 \end{aligned}$$

LAMPIRAN B (Kapasitas Panas Molar Gas)

The Molar Heat Capacities of Gases in the Ideal Gas (Zero-Pressure) State*

		<i>a</i>	<i>b</i> × 10 ²	<i>c</i> × 10 ⁵	<i>d</i> × 10 ⁹	Temperature Range K
<i>Paraffinic Hydrocarbons</i>						
Methane	CH ₄	19.875	5.021	1.268	-11.004	273-1500
Ethane	C ₂ H ₆	6.895	17.255	-6.402	7.280	273-1500
Propane	C ₃ H ₈	-4.042	30.456	-15.711	31.716	273-1500
<i>n</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	3.954	37.126	-18.326	34.979	273-1500
<i>i</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	-7.908	41.573	-22.992	49.875	273-1500
<i>n</i> -Pentane	C ₅ H ₁₂	6.770	45.398	-22.448	42.259	273-1500
<i>n</i> -Hexane	C ₆ H ₁₄	6.933	55.188	-28.636	57.657	273-1500
<i>Monoolefinic Hydrocarbons</i>						
Ethylene	C ₂ H ₄	3.950	15.628	-8.339	17.657	273-1500
Propylene	C ₃ H ₆	3.151	23.812	-12.176	24.603	273-1500
<i>1</i> -Butene	C ₄ H ₈	-1.004	36.193	-21.381	50.502	273-1500
<i>i</i> -Butene	C ₄ H ₈	6.904	32.226	-16.657	33.557	273-1500
<i>cis</i> -2-Butene	C ₄ H ₈	-7.439	33.799	-17.046	33.013	273-1500
<i>trans</i> -2-Butene	C ₄ H ₈	9.791	30.209	-14.239	25.398	273-1500
<i>Cycloparaffinic Hydrocarbons</i>						
Cyclopentane	C ₅ H ₁₀	-54.213	54.757	-31.159	68.661	273-1500
Methylcyclopentane	C ₆ H ₁₂	-50.686	64.352	-37.301	83.808	273-1500
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	-66.674	68.845	-38.506	80.628	273-1500
Methylcyclohexane	C ₇ H ₁₄	-63.054	79.381	-45.979	100.795	273-1500
<i>Aromatic Hydrocarbons</i>						
Benzene	C ₆ H ₆	-36.193	48.444	-31.548	77.573	273-1500
Toluene	C ₇ H ₈	-34.364	55.887	-34.435	80.335	273-1500
Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	-35.138	66.674	-41.854	109.209	273-1500
Styrene	C ₈ H ₈	-24.971	60.059	-38.285	92.176	273-1500
Cumene	C ₉ H ₁₂	-39.548	78.184	-49.661	120.502	273-1500
<i>Oxygenated Hydrocarbons</i>						
Formaldehyde	CH ₂ O	22.791	4.075	0.713	-8.695	273-1500
Acetaldehyde	C ₂ H ₄ O	17.531	13.239	-2.155	-15.900	273-1000
Methanol	CH ₄ O	19.038	9.146	-1.218	-8.034	273-1000
Ethanol	C ₂ H ₆ O	19.875	20.946	-10.372	20.042	273-1500
Ethylene oxide	C ₂ H ₄ O	-4.686	20.607	-9.996	13.176	273-1000
Ketene	C ₂ H ₂ O	17.197	12.410	-7.502	17.657	273-1500

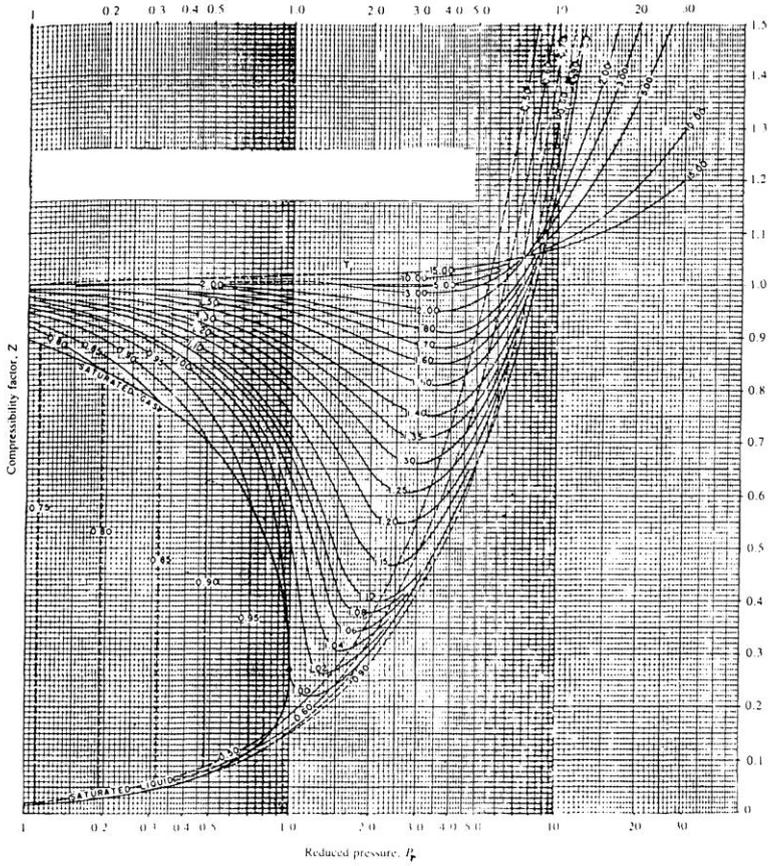
*Constants are for the equation $C_p = a + bT + cT^2 + dT^3$, where T is in degrees Kelvin and C_p in J(mol K)⁻¹.

						Temperature Range K
		<i>a</i>	<i>b</i> × 10 ³	<i>c</i> × 10 ⁵	<i>d</i> × 10 ⁹	
<i>Oxides of Nitrogen</i>						
Nitric oxide	NO	27.034	0.987	-0.322	0.365	273-3800
Nitric oxide	NO	29.322	-0.094	0.974	-4.184	273-1500
Nitrous oxide	N ₂ O	24.092	5.859	-3.560	10.569	273-1500
Nitrogen dioxide	NO ₂	22.929	5.711	-3.519	7.866	273-1500
Nitrogen tetroxide	N ₂ O ₄	33.054	18.661	-11.339		273-600
<i>Acetylenes and Diolefins</i>						
Acetylene	C ₂ H ₂	21.799	9.208	-6.523	18.197	273-1500
Methylacetylene	C ₃ H ₄	17.615	17.042	-9.172	19.720	273-1500
Dimethylacetylene	C ₄ H ₆	14.812	24.427	-11.548	20.812	273-1500
Propadiene	C ₃ H ₄	10.167	19.636	-11.636	27.130	273-1500
1,3-Butadiene	C ₄ H ₆	-5.398	34.937	-23.356	59.582	273-1500
Isoprene	C ₅ H ₈	-1.841	43.590	-28.293	70.837	273-1500
<i>Combustion Gases (Low Range)</i>						
Nitrogen	N ₂	28.883	-0.157	0.808	-2.871	273-1800
Oxygen	O ₂	25.460	1.519	-0.715	1.311	273-1800
Air		28.088	0.197	0.480	-1.965	273-1800
Hydrogen	H ₂	29.088	-0.192	0.400	-0.870	273-1800
Carbon monoxide	CO	28.142	0.167	0.537	-2.221	273-1800
Carbon dioxide	CO ₂	22.243	5.977	-3.499	7.464	273-1800
Water vapor	H ₂ O	32.218	0.192	1.055	-3.593	273-1800
Ammonia	NH ₃	24.619	3.75	-0.138		300-1500
<i>Combustion Gases (High Range)†</i>						
Nitrogen	N ₂	27.318	0.623	-0.095		273-3800
Oxygen	O ₂	28.167	0.630	-0.075		273-3800
Air		27.435	0.618	-0.090		273-3800
Hydrogen	H ₂	26.879	0.435	-0.033		273-3800
Carbon monoxide	CO	27.113	0.655	-0.100		273-3800
Water vapor	H ₂ O	29.163	1.449	-0.202		273-3800
<i>Sulfur Compounds</i>						
Sulfur	S ₂	27.193	2.217	-1.627	3.983	273-1800
Sulfur dioxide	SO ₂	25.762	5.791	-3.809	8.607	273-1800
Sulfur trioxide	SO ₃	16.393	14.573	-11.193	32.402	273-1300
Hydrogen sulfide	H ₂ S	29.582	1.309	0.571	-3.292	273-1800
Carbon disulfide	CS ₂	30.921	6.230	-4.586	11.548	273-1800
Carbonyl sulfide	COS	26.034	6.427	-4.427	10.711	273-1800

Based on data in O. Hougen, K. Watson, and R. A. Ragatz, *Chemical Process Principles*, Part 1. John Wiley & Sons, New York, 1954. Used with permission.

†The equation for CO₂ in the temperature range of 273-3800 K is $C_p = 75.464 - 1.872 \times 10^{-4}T - 661.42/\sqrt{T}$.

LAMPIRAN C (Grafik Faktor Kompresibilitas)



LAMPIRAN D (Tabel Z⁽⁰⁾ sebagai fungsi P_r dan T_r)

<i>P_r</i> =	0.0100	0.0500	0.1000	0.2000	0.4000	0.6000	0.8000	1.0000
<i>T_r</i>								
0.30	0.0029	0.0145	0.0290	0.0579	0.1158	0.1737	0.2315	0.2892
0.35	0.0026	0.0130	0.0261	0.0522	0.1043	0.1564	0.2084	0.2604
0.40	0.0024	0.0119	0.0239	0.0477	0.0953	0.1429	0.1904	0.2379
0.45	0.0022	0.0110	0.0221	0.0442	0.0882	0.1322	0.1762	0.2200
0.50	0.0021	0.0103	0.0207	0.0413	0.0825	0.1236	0.1647	0.2056
0.55	0.9804	0.0098	0.0195	0.0390	0.0778	0.1166	0.1553	0.1939
0.60	0.9849	0.0093	0.0186	0.0371	0.0741	0.1109	0.1476	0.1842
0.65	0.9881	0.9377	0.0178	0.0356	0.0710	0.1063	0.1415	0.1765
0.70	0.9904	0.9504	0.8958	0.0344	0.0687	0.1027	0.1366	0.1703
0.75	0.9922	0.9598	0.9165	0.0336	0.0670	0.1001	0.1330	0.1656
0.80	0.9935	0.9669	0.9319	0.8539	0.0661	0.0985	0.1307	0.1626
0.85	0.9946	0.9725	0.9436	0.8810	0.0661	0.0983	0.1301	0.1614
0.90	0.9954	0.9768	0.9528	0.9015	0.7800	0.1006	0.1321	0.1630
0.93	0.9959	0.9790	0.9573	0.9115	0.8059	0.6635	0.1359	0.1664
0.95	0.9961	0.9803	0.9600	0.9174	0.8206	0.6967	0.1410	0.1705
0.97	0.9963	0.9815	0.9625	0.9227	0.8338	0.7240	0.5580	0.1779
0.98	0.9965	0.9821	0.9637	0.9253	0.8398	0.7360	0.5887	0.1844
0.99	0.9966	0.9826	0.9648	0.9277	0.8455	0.7471	0.6138	0.1959
1.00	0.9967	0.9832	0.9659	0.9300	0.8509	0.7574	0.6355	0.2901
1.01	0.9968	0.9837	0.9669	0.9322	0.8561	0.7671	0.6542	0.4648
1.02	0.9969	0.9842	0.9679	0.9343	0.8610	0.7761	0.6710	0.5146
1.05	0.9971	0.9855	0.9707	0.9401	0.8743	0.8002	0.7130	0.6026
1.10	0.9975	0.9874	0.9747	0.9485	0.8930	0.8323	0.7649	0.6880
1.15	0.9978	0.9891	0.9780	0.9554	0.9081	0.8576	0.8032	0.7443
1.20	0.9981	0.9904	0.9808	0.9611	0.9205	0.8779	0.8330	0.7858
1.30	0.9985	0.9926	0.9852	0.9702	0.9396	0.9083	0.8764	0.8438
1.40	0.9988	0.9942	0.9884	0.9768	0.9534	0.9298	0.9062	0.8827
1.50	0.9991	0.9954	0.9909	0.9818	0.9636	0.9456	0.9278	0.9103
1.60	0.9993	0.9964	0.9928	0.9856	0.9714	0.9575	0.9439	0.9308
1.70	0.9994	0.9971	0.9943	0.9886	0.9775	0.9667	0.9563	0.9463
1.80	0.9995	0.9977	0.9955	0.9910	0.9823	0.9739	0.9659	0.9583
1.90	0.9996	0.9982	0.9964	0.9929	0.9861	0.9796	0.9735	0.9678
2.00	0.9997	0.9985	0.9972	0.9944	0.9892	0.9842	0.9796	0.9754
2.20	0.9998	0.9992	0.9983	0.9967	0.9937	0.9910	0.9886	0.9865
2.40	0.9999	0.9996	0.9991	0.9983	0.9969	0.9957	0.9948	0.9941
2.60	1.0000	0.9998	0.9997	0.9994	0.9991	0.9990	0.9990	0.9993
2.80	1.0000	1.0000	1.0001	1.0002	1.0007	1.0013	1.0021	1.0031
3.00	1.0000	1.0002	1.0004	1.0008	1.0018	1.0030	1.0043	1.0057
3.50	1.0001	1.0004	1.0008	1.0017	1.0035	1.0055	1.0075	1.0097
4.00	1.0001	1.0005	1.0010	1.0021	1.0043	1.0066	1.0090	1.0115

LAMPIRAN D (Tabel Z⁽¹⁾) sebagai fungsi P_r dan T_r)

$P_r =$	0.0100	0.0500	0.1000	0.2000	0.4000	0.6000	0.8000	1.0000
T_r								
0.30	-0.0008	-0.0040	-0.0081	-0.0161	-0.0323	-0.0484	-0.0645	-0.0806
0.35	-0.0009	-0.0046	-0.0093	-0.0185	-0.0370	-0.0554	-0.0738	-0.0921
0.40	-0.0010	-0.0048	-0.0095	-0.0190	-0.0380	-0.0570	-0.0758	-0.0946
0.45	-0.0009	-0.0047	-0.0094	-0.0187	-0.0374	-0.0560	-0.0745	-0.0929
0.50	-0.0009	-0.0045	-0.0090	-0.0181	-0.0360	-0.0539	-0.0716	-0.0893
0.55	-0.0314	-0.0043	-0.0086	-0.0172	-0.0343	-0.0513	-0.0682	-0.0849
0.60	-0.0205	-0.0041	-0.0082	-0.0164	-0.0326	-0.0487	-0.0646	-0.0803
0.65	-0.0137	-0.0772	-0.0078	-0.0156	-0.0309	-0.0461	-0.0611	-0.0759
0.70	-0.0093	-0.0507	-0.1161	-0.0148	-0.0294	-0.0438	-0.0579	-0.0718
0.75	-0.0064	-0.0339	-0.0744	-0.0143	-0.0282	-0.0417	-0.0550	-0.0681
0.80	-0.0044	-0.0228	-0.0487	-0.1160	-0.0272	-0.0401	-0.0526	-0.0648
0.85	-0.0029	-0.0152	-0.0319	-0.0715	-0.0268	-0.0391	-0.0509	-0.0622
0.90	-0.0019	-0.0099	-0.0205	-0.0442	-0.1118	-0.0396	-0.0503	-0.0504
0.93	-0.0015	-0.0075	-0.0154	-0.0326	-0.0763	-0.1662	-0.0514	-0.0602
0.95	-0.0012	-0.0062	-0.0126	-0.0262	-0.0589	-0.1110	-0.0540	-0.0607
0.97	-0.0010	-0.0050	-0.0101	-0.0208	-0.0450	-0.0770	-0.1647	-0.0623
0.98	-0.0009	-0.0044	-0.0090	-0.0184	-0.0390	-0.0641	-0.1100	-0.0641
0.99	-0.0008	-0.0039	-0.0079	-0.0161	-0.0335	-0.0531	-0.0796	-0.0680
1.00	-0.0007	-0.0034	-0.0069	-0.0140	-0.0285	-0.0435	-0.0588	-0.0879
1.01	-0.0006	-0.0030	-0.0060	-0.0120	-0.0240	-0.0351	-0.0429	-0.0223
1.02	-0.0005	-0.0026	-0.0051	-0.0102	-0.0198	-0.0277	-0.0303	-0.0062
1.05	-0.0003	-0.0015	-0.0029	-0.0054	-0.0092	-0.0097	-0.0032	0.0220
1.10	0.0000	0.0000	0.0001	0.0007	0.0038	0.0106	0.0236	0.0476
1.15	0.0002	0.0011	0.0023	0.0052	0.0127	0.0237	0.0396	0.0625
1.20	0.0004	0.0019	0.0039	0.0084	0.0190	0.0326	0.0499	0.0719
1.30	0.0006	0.0030	0.0061	0.0125	0.0267	0.0429	0.0612	0.0819
1.40	0.0007	0.0036	0.0072	0.0147	0.0306	0.0477	0.0661	0.0857
1.50	0.0008	0.0039	0.0078	0.0158	0.0323	0.0497	0.0677	0.0864
1.60	0.0008	0.0040	0.0080	0.0162	0.0330	0.0501	0.0677	0.0855
1.70	0.0008	0.0040	0.0081	0.0163	0.0329	0.0497	0.0667	0.0838
1.80	0.0008	0.0040	0.0081	0.0162	0.0325	0.0488	0.0652	0.0814
1.90	0.0008	0.0040	0.0079	0.0159	0.0318	0.0477	0.0635	0.0792
2.00	0.0008	0.0039	0.0076	0.0155	0.0310	0.0464	0.0617	0.0767
2.20	0.0007	0.0037	0.0074	0.0147	0.0293	0.0437	0.0579	0.0719
2.40	0.0007	0.0035	0.0070	0.0139	0.0276	0.0411	0.0544	0.0675
2.60	0.0007	0.0033	0.0066	0.0131	0.0260	0.0387	0.0512	0.0634
2.80	0.0006	0.0031	0.0062	0.0124	0.0245	0.0365	0.0483	0.0598
3.00	0.0006	0.0029	0.0059	0.0117	0.0232	0.0345	0.0456	0.0565
3.50	0.0005	0.0026	0.0052	0.0103	0.0204	0.0303	0.0401	0.0497
4.00	0.0005	0.0023	0.0046	0.0091	0.0182	0.0270	0.0357	0.0443

LAMPIRAN E (Tabel Titik Kritik Senyawa Murni)

	Molar mass	ω	T_c/K	P_c/bar	Z_c	V_c $\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$	T_n/K
Methane	16.043	0.012	190.6	45.99	0.286	98.6	111.4
Ethane	30.070	0.100	305.3	48.72	0.279	145.5	184.6
Propane	44.097	0.152	369.8	42.48	0.276	200.0	231.1
<i>n</i> -Butane	58.123	0.200	425.1	37.96	0.274	255.	272.7
<i>n</i> -Pentane	72.150	0.252	469.7	33.70	0.270	313.	309.2
<i>n</i> -Hexane	86.177	0.301	507.6	30.25	0.266	371.	341.9
<i>n</i> -Heptane	100.204	0.350	540.2	27.40	0.261	428.	371.6
<i>n</i> -Octane	114.231	0.400	568.7	24.90	0.256	486.	398.8
<i>n</i> -Nonane	128.258	0.444	594.6	22.90	0.252	544.	424.0
<i>n</i> -Decane	142.285	0.492	617.7	21.10	0.247	600.	447.3
Isobutane	58.123	0.181	408.1	36.48	0.282	262.7	261.4
Isooctane	114.231	0.302	544.0	25.68	0.266	468.	372.4
Cyclopentane	70.134	0.196	511.8	45.02	0.273	258.	322.4
Cyclohexane	84.161	0.210	553.6	40.73	0.273	308.	353.9
Methylcyclopentane	84.161	0.230	532.8	37.85	0.272	319.	345.0
Methylcyclohexane	98.188	0.235	572.2	34.71	0.269	368.	374.1
Ethylene	28.054	0.087	282.3	50.40	0.281	131.	169.4
Propylene	42.081	0.140	365.6	46.65	0.289	188.4	225.5
1-Butene	56.108	0.191	420.0	40.43	0.277	239.3	266.9
<i>cis</i> -2-Butene	56.108	0.205	435.6	42.43	0.273	233.8	276.9
<i>trans</i> -2-Butene	56.108	0.218	428.6	41.00	0.275	237.7	274.0
1-Hexene	84.161	0.280	504.0	31.40	0.265	354.	336.3
Isobutylene	56.108	0.194	417.9	40.00	0.275	238.9	266.3
1,3-Butadiene	54.092	0.190	425.2	42.77	0.267	220.4	268.7
Cyclohexene	82.145	0.212	560.4	43.50	0.272	291.	356.1
Acetylene	26.038	0.187	308.3	61.39	0.271	113.	189.4
Benzene	78.114	0.210	562.2	48.98	0.271	259.	353.2
Toluene	92.141	0.262	591.8	41.06	0.264	316.	383.8
Ethylbenzene	106.157	0.303	617.2	36.06	0.263	374.	409.4
Cumene	120.194	0.326	631.1	32.09	0.261	427.	425.6
<i>o</i> -Xylene	106.167	0.310	630.3	37.34	0.263	369.	417.6
<i>m</i> -Xylene	106.167	0.326	617.1	35.36	0.259	376.	412.3
<i>p</i> -Xylene	106.167	0.322	616.2	35.11	0.260	379.	411.5
Styrene	104.152	0.297	636.0	38.40	0.256	352.	418.3
Naphthalene	128.174	0.302	748.4	40.51	0.269	413.	
Biphenyl	154.211	0.365	789.3	38.50	0.295	502.	528.2
Formaldehyde	30.026	0.282	408.0	65.90	0.223	115.	254.1
Acetaldehyde	44.053	0.291	466.0	55.50	0.221	154.	294.0
Methyl acetate	74.079	0.331	506.6	47.50	0.257	228.	330.1
Ethyl acetate	88.106	0.366	523.3	38.80	0.255	286.	350.2
Acetone	58.080	0.307	508.2	47.01	0.233	209.	329.4
Methyl ethyl ketone	72.107	0.323	535.5	41.50	0.249	267.	352.8
Diethyl ether	74.123	0.281	466.7	36.40	0.263	280.	307.6
Methyl <i>t</i> -butyl ether	88.150	0.266	497.1	34.30	0.273	329.	328.4

LAMPIRAN F (Tabel Entalpi Pembentukan dan Energi Bebas Gibbs Standar pada 298,15 K)

Standard Enthalpies and Gibbs Energies of Formation at 298.15 K for One Mole of Each Substance from Its Elements

Chemical Species		State (See Note)	ΔH_f° kJ/mol of the Substance Formed	ΔG_f°
<i>Paraffinic Hydrocarbons</i>				
Methane	CH ₄	(g)	-74.5	-50.5
Ethane	C ₂ H ₆	(g)	-83.8	-31.9
Propane	C ₃ H ₈	(g)	-104.7	-24.3
<i>n</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	(g)	-125.8	-16.6
<i>n</i> -Pentane	C ₅ H ₁₂	(g)	-146.8	-8.7
<i>n</i> -Pentane	C ₅ H ₁₂	(l)	-173.1	-9.2
<i>n</i> -Hexane	C ₆ H ₁₄	(g)	-166.9	0.2
<i>n</i> -Heptane	C ₇ H ₁₆	(g)	-187.8	8.3
<i>n</i> -Octane	C ₈ H ₁₈	(g)	-208.8	16.3
<i>n</i> -Octane	C ₈ H ₁₈	(l)	-255.1	—
<i>Unsaturated Hydrocarbons</i>				
Acetylene	C ₂ H ₂	(g)	227.5	210.0
Ethylene	C ₂ H ₄	(g)	52.5	68.5
Propylene	C ₃ H ₆	(g)	19.7	62.2
1-Butene	C ₄ H ₈	(g)	1.2	70.3
1-Pentene	C ₅ H ₁₀	(g)	-21.3	78.4
1-Hexene	C ₆ H ₁₂	(g)	-42.0	86.8
1-Heptene	C ₇ H ₁₄	(g)	-62.8	—
1,3-Butadiene	C ₄ H ₆	(g)	109.2	149.8
<i>Aromatic Hydrocarbons</i>				
Benzene	C ₆ H ₆	(g)	82.9	129.7
Benzene	C ₆ H ₆	(l)	49.1	124.5
Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	(g)	29.9	130.9
Naphthalene	C ₁₀ H ₈	(s)	78.5	—
Styrene	C ₈ H ₈	(g)	147.4	213.9
Toluene	C ₇ H ₈	(g)	50.2	122.1
Toluene	C ₇ H ₈	(l)	12.2	113.6
<i>Cyclic Hydrocarbons</i>				
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	(g)	-123.1	31.9
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	(l)	-156.2	26.9
Cyclopropane	C ₃ H ₆	(g)	53.3	104.5
Methylcyclohexane	C ₇ H ₁₄	(g)	-154.8	27.5
Methylcyclohexane	C ₇ H ₁₄	(l)	-190.2	20.6
Cyclohexene	C ₆ H ₁₀	(l)	—	106.9

LAMPIRAN G (Tabel Uap Air)

The Thermodynamic Properties of Water and Steam¹

THERMODYNAMIC PROPERTIES OF STEAM

Saturated Steam: Temperature Table

Temp °C <i>T</i>	Press. kPa <i>P</i>	Specific Volume		Internal Energy			Enthalpy			Entropy		
		Sat. Liquid \hat{V}^L	Sat. Vapor \hat{V}^V	Sat. Liquid \hat{U}^L	Evap. $\Delta\hat{U}$	Sat. Vapor \hat{U}^V	Sat. Liquid \hat{H}^L	Evap. $\Delta\hat{H}$	Sat. Vapor \hat{H}^V	Sat. Liquid \hat{S}^L	Evap. $\Delta\hat{S}$	Sat. Vapor \hat{S}^V
0.01	0.6113	0.001 000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001 000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001 000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001 001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001 002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001 003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001 004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001 006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001 008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001 010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001 012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001 015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001 017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001 020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001 023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001 026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001 029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001 033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001 036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001 040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
MPa												
100	0.101 35	0.001 044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.120 82	0.001 048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.143 27	0.001 052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.169 06	0.001 056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.198 53	0.001 060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001 065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001 070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269

$$\hat{V} [=] \text{m}^3/\text{kg}; \quad \hat{U}, \hat{H} [=] \text{J/g} = \text{kJ/kg}; \quad \hat{S} [=] \text{kJ/kg K}$$

¹From G. J. Van Wylen and R. E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics, S. I. Version*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1978. Used with permission.

Saturated Steam: Temperature Table (Continued)

Temp °C T	Press. MPa P	Specific Volume		Internal Energy			Enthalpy			Entropy		
		Sat. Liquid \hat{V}^L	Sat. Vapor \hat{V}^V	Sat. Liquid \hat{U}^L	Evap. $\Delta\hat{U}$	Sat. Vapor \hat{U}^V	Sat. Liquid \hat{H}^L	Evap. $\Delta\hat{H}$	Sat. Vapor \hat{H}^V	Sat. Liquid \hat{S}^L	Evap. $\Delta\hat{S}$	Sat. Vapor \hat{S}^V
135	0.3130	0.001 075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001 080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001 085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001 091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001 096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001 102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001 108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001 114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001 121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180	1.0021	0.001 127	0.194 05	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001 134	0.174 09	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001 141	0.156 54	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001 149	0.141 05	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698
200	1.5538	0.001 157	0.127 36	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	4.1014	6.4323
205	1.7230	0.001 164	0.115 21	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172	6.3952
210	1.9062	0.001 173	0.104 41	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337	6.3585
215	2.104	0.001 181	0.094 79	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507	6.3221
220	2.318	0.001 190	0.086 19	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683	6.2861
225	2.548	0.001 199	0.078 49	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863	6.2503
230	2.795	0.001 209	0.071 58	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047	6.2146
235	3.060	0.001 219	0.065 37	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233	6.1791
240	3.344	0.001 229	0.059 76	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422	6.1437
245	3.648	0.001 240	0.054 71	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612	6.1083
250	3.973	0.001 251	0.050 13	1080.39	1522.0	2602.4	1085.36	1716.2	2801.5	2.7927	3.2802	6.0730
255	4.319	0.001 263	0.045 98	1104.28	1496.7	2600.9	1109.73	1689.8	2799.5	2.8383	3.1992	6.0375
260	4.688	0.001 276	0.042 21	1128.39	1470.6	2599.0	1134.37	1662.5	2796.9	2.8838	3.1181	6.0019
265	5.081	0.001 289	0.038 77	1152.74	1443.9	2596.6	1159.28	1634.4	2793.6	2.9294	3.0368	5.9662
270	5.499	0.001 302	0.035 64	1177.36	1416.3	2593.7	1184.51	1605.2	2789.7	2.9751	2.9551	5.9301
275	5.942	0.001 317	0.032 79	1202.25	1387.9	2590.2	1210.07	1574.9	2785.0	3.0208	2.8730	5.8938
280	6.412	0.001 332	0.030 17	1227.46	1358.7	2586.1	1235.99	1543.6	2779.6	3.0668	2.7903	5.8571
285	6.909	0.001 348	0.027 77	1253.00	1328.4	2581.4	1262.31	1511.0	2773.3	3.1130	2.7070	5.8199
290	7.436	0.001 366	0.025 57	1278.92	1297.1	2576.0	1289.07	1477.1	2766.2	3.1594	2.6227	5.7821
295	7.993	0.001 384	0.023 54	1305.2	1264.7	2569.9	1316.3	1441.8	2758.1	3.2062	2.5375	5.7437
300	8.581	0.001 404	0.021 67	1332.0	1231.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	2.4511	5.7045
305	9.202	0.001 425	0.019 948	1359.3	1195.9	2555.2	1372.4	1366.4	2738.7	3.3010	2.3633	5.6643
310	9.856	0.001 447	0.018 350	1387.1	1159.4	2546.4	1401.3	1326.0	2727.3	3.3493	2.2737	5.6230
315	10.547	0.001 472	0.016 867	1415.5	1121.1	2536.6	1431.0	1283.5	2714.5	3.3982	2.1821	5.5804
320	11.274	0.001 499	0.015 488	1444.6	1080.9	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	2.0882	5.5362
330	12.845	0.001 561	0.012 996	1505.3	993.7	2498.9	1525.3	1140.6	2665.9	3.5507	1.8909	5.4417
340	14.586	0.001 638	0.010 797	1570.3	894.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	1.6763	5.3357
350	16.513	0.001 740	0.008 813	1641.9	776.6	2418.4	1670.6	893.4	2563.9	3.7777	1.4335	5.2112
360	18.651	0.001 893	0.006 945	1725.2	626.3	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	1.1379	5.0526
370	21.03	0.002 213	0.004 925	1844.0	384.5	2228.5	1890.5	441.6	2332.1	4.1106	0.6865	4.7971
374.14	22.09	0.003 155	0.003 155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

\hat{V} [=] m³/kg; \hat{U}, \hat{H} [=] J/g = kJ/kg; \hat{S} [=] kJ/kg K

Biografi Penulis



Penulis dilahirkan di Klaten, 16 November 1975. Pendidikan Sekolah Dasar sampai Sekolah Menengah Tingkat Atas diselesaikan oleh Penulis di Klaten, Jawa Tengah. Setelah lulus dari SMAN 1 Klaten, Penulis melanjutkan studi di Universitas Gadjah Mada (UGM), Yogyakarta, dengan menempuh program studi S-1 Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik.

Setelah Penulis lulus dari S-1 Jurusan Teknik Kimia UGM, Penulis sempat bekerja di industri beberapa saat, selanjutnya berkarir sebagai Staf Pendidik di Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional, di Bandung. Selama berkarir tersebut, Penulis melanjutkan studi jenjang S-2 di Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, dan lulus pada tahun 2006.

Pada saat ini Penulis bertugas sebagai tenaga pendidik di program studi Sarjana Terapan Teknologi Industri Kimia, Sekolah Vokasi, Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Jawa Barat.

Buku ajar dengan judul Termodinamika Teknik: Dasar-Dasar Konversi Energi (Bagian-1) ini membahas mengenai teori-teori dasar dalam termodinamika yang dibutuhkan dalam aktivitas (perancangan, operasi, maupun evaluasi) teknis, yang berhubungan dengan pengkonversian energi.

Buku ajar ini merupakan Bagian ke-1 dari 2 bagian.

Secara utuh, buku ajar ini terdiri 10 Bab. Pada Bagian ke-1 pada buku ajar ini diulas sebanyak 6 Bab.

Bab 1 merupakan Bab Pendahuluan. Pada bab ini ditinjau secara ringkas pengertian, sejarah perkembangan, dan penerapan ilmu termodinamika. Bab 2 membahas mengenai Konsep Dasar Termodinamika, suatu bahasan tentang istilah-istilah dasar beserta pengertian dan rumusan dasar dalam ilmu termodinamika.

Bab-bab selanjutnya menguraikan tentang Bentuk-Bentuk Energi, Diagram dan Tabel Termodinamika, Persamaan Keadaan, dan diakhiri dengan Bab 6 tentang Hukum I Termodinamika.

Pada bagian akhir setiap bab dilengkapi dengan 2 contoh soal dan pembahasan. Untuk keperluan para pembaca berlatih sebagai pengukur pemahaman terhadap materi yang disajikan, buku ajar ini juga dilengkapi dengan 5-9 soal latihan yang telah disertakan dengan jawaban akhir dari setiap soal tersebut.