



TERMODINAMIKA

Ditulis Oleh:

Analekta Tiara Perdana, Jannes Bastian Selly, Erwin Randjawali,
Eka Sriwahyuni, Desy Nurhasanah Sari, Azmalaeni Rifkah Ansyarif,
Jan Setiawan, Fahmy Rinanda Saputri, Neny Rochyani,
Alvin Dior Al Ghifari, Muhammad Lawrence Pattersons



TERMODINAMIKA

**Analekta Tiara Perdana
Jannes Bastian Selly
Erwin Randjawali
Eka Sriwahyuni
Desy Nurhasanah Sari
Azmalaeni Rifkah Ansyarif
Jan Setiawan
Fahmy Rinanda Saputri
Neny Rochyani
Alvin Dior Al Ghifari
Muhammad Lawrence Pattersons**



GET PRESS INDONESIA

TERMODINAMIKA

Penulis :

Analekta Tiara Perdana
Jannes Bastian Selly
Erwin Randjawali
Eka Sriwahyuni
Desy Nurhasanah Sari
Azmaelaeni Rifkah Ansyarif
Jan Setiawan
Fahmy Rinanda Saputri
Neny Rochyani
Alvin Dior Al Ghifari
Muhammad Lawrence Pattersons

ISBN : 978-623-198-621-4

Editor : Dr. Neila Sulung, N.S., S.Pd., M.Kes.
Ilda Melisa, A.Md.Kep.

Penyunting: Dr. Oktavianis, M.Biomed.

Desain Sampul dan Tata Letak : Tri Putri Wahyuni, S.Pd

Penerbit : GETPRESS INDONESIA
Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat

website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, 21 Agustus 2023

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kehadiran Allah SWT, atas limpahan rahmat dan hidayahNya, maka Penulisan Buku dengan judul Termodinamika dapat diselesaikan dengan baik atas kerjasama tim penulis. Buku ini mencakup pengantar termodinamika, hukum ke-0 termodinamika, konsep temperatur, sistem termodinamika, fase dan perubahan fase (padat, cair, dan gas), kalor, kapasitas panas, hukum I termodinamika, entropi, proses carnot, potensial termodinamika: energi dalam dan transformasi legendre.

Buku ini masih banyak kekurangan dalam penyusunannya. Oleh karena itu, kami sangat mengharapkan kritik dan saran demi perbaikan dan kesempurnaan buku ini selanjutnya. Kami mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian Buku ini. Semoga Buku ini dapat menjadi sumber referensi dan literatur yang mudah dipahami.

Padang, 21 Agustus 2023
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	v
BAB 1 PENGANTAR TERMODINAMIKA	1
1.1 Konsep Termodinamika	1
1.2 Sistem Termodinamika	3
1.2.1 Sistem Terisolasi	6
1.2.2 Sistem Tertutup	6
1.2.3 Sistem Terbuka	7
1.3 Energi	8
1.4 Properti dari Sistem	10
1.5 Proses dan Siklus	11
1.5.1 Proses	11
1.5.2 Siklus	12
1.6 Keseimbangan Termodinamika	14
DAFTAR PUSTAKA	17
BAB 2 HUKUM KE-0 TERMODINAMIKA	19
2.1 Pendahuluan	19
2.2 Keseimbangan termal (<i>thermal equilibrium</i>)	20
2.2 Suhu dan Hukum Nol Termodinamika	21
2.2.1 Konsep dasar perumusan hukum nol termodinamika	22
2.2.2 Asal mula penamaan hukum nol termodinamika	24
2.3 Aplikasi Hukum Nol Termodinamika	25
2.3.1 Prinsip dasar pengukuran suhu	25
2.3.2 Jenis-jenis termometer	26
2.3.3 Skala pengukuran suhu	28
DAFTAR PUSTAKA	33
BAB 3 KONSEP TEMPERATUR	35
3.1 Pendahuluan	35
3.2 Termometer	36
3.3 Skala Temperatur	37
3.4 Hubungan Antar Skala Temperatur	40
3.5 Keseimbangan Termal dan Hukum Termodinamika ke Nol	41
DAFTAR PUSTAKA	43
BAB 4 SISTEM TERMODINAMIKA	45
4.1 Pendahuluan	45
4.2 Sistem Termodinamika	47
4.2.1 Sistem Terbuka	50
4.2.2 Sistem Tertutup	52
4.2.2 Sistem Termodinamika Terisolasi	55
DAFTAR PUSTAKA	57

BAB 5 FASE DAN PERUBAHAN FASE (PADAT, CAIR, DAN GAS).....	59
5.1 Fase	59
5.2 Perubahan Wujud Zat	62
5.3 Perubahan Fase	66
5.4 Diagram Fase	71
DAFTAR PUSTAKA.....	76
BAB 6 KALOR.....	77
6.1 Kalor sebagai Transfer Energi	77
6.2 Energi Thermal	79
6.2.1 Perbedaan Temperatur, Kalor, dan Energi Termal	79
6.2.2 Gas Ideal dari Energi Termal	80
6.3 Kalor Jenis	81
6.3.1 Kalor Jenis untuk Gas	82
6.4 Penyelesaian Soal Menggunakan Kalorimetri	82
6.5 Kalor Laten	84
6.6 Perpindahan Kalor	86
6.6.1 Konduksi.....	86
6.6.2 Konveksi	89
6.6.3 Radiasi	89
DAFTAR PUSTAKA.....	91
BAB 7 KAPASITAS PANAS	93
7.1 Kapasitas Panas	93
7.2 Kalor Transformasi.....	99
7.3 Pengukuran Kapasitas Panas Spesifik	102
DAFTAR PUSTAKA.....	106
BAB 8 HUKUM I TERMODINAMIKA	107
8.1 Pendahuluan	107
8.2 Proses Isotermal	112
8.2.1 Persamaan matematis proses isotermal	113
8.2.2 Contoh kasus proses isotermal.....	115
8.3 Proses Isobarik	117
8.3.1 Persamaan matematik proses isobarik	118
8.3.2 Contoh kasus proses isobarik	119
8.4 Proses Isokhorik	119
8.4.1 Persamaan matematik proses isokhorik.....	120
8.4.2 Contoh kasus proses isokhorik.....	121
8.5 Proses Adiabatik	124
8.5.1 Persamaan matematik proses adiabatik	125
8.5.2 Contoh kasus proses adiabatik.....	126
8.6 Aplikasi Hukum Termodinamika 1	129
DAFTAR PUSTAKA.....	131
BAB 9 ENTROPI	133

9.1 Pendahuluan	133
9.2 Entropi dan Hukum Termodinamika II	134
9.3 Perubahan Entropi	139
9.4 Entropi dalam Ilmu Kimia	141
9.5 Perhitungan Entropi	144
DAFTAR PUSTAKA	150
BAB 10 PROSES CARNOT	151
10.1 Pendahuluan	151
10.2 Hukum Kedua Termodinamika	153
10.3 Pernyataan Kelvin-Planck	156
10.4 Pernyataan Clausius	157
10.5 Proses Carnot	158
DAFTAR PUSTAKA	163
BAB 11 POTENSIAL TERMODINAMIKA: ENERGI DALAM DAN TRANSFORMASI LEGENDRE	165
11.1 Pendahuluan	165
11.2 Gagasan tentang Potensial Termodinamika	166
11.2.1 Energi Dalam	168
11.2.2 Entalpi	168
11.2.3 Energi Bebas Helmholtz	168
11.2.4 Energi Bebas Gibbs	168
11.3 Konstruksi Formulasi Energi Dalam	169
11.3.1 <i>Microcanonical Ensemble</i>	169
11.3.2 <i>Canonical Ensemble</i>	170
11.3.3 <i>Grand Canonical Ensemble</i>	173
11.3.4 Perumusan Energi Dalam Gas Ideal	175
11.4 Transformasi Legendre	181
11.4.1 Formulasi Transformasi Legendre	181
11.4.2 Aplikasi Transformasi Legendre pada Potensial-potensial Termodinamika	183
11.5 Pengayaan: Potensial Kimia	186
DAFTAR PUSTAKA	187
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Ilustrasi Termodinamika	1
Gambar 1.2. Ilustrasi Sistem	3
Gambar 1.3. Ilustrasi <i>Boundary</i> Nyata dan Imajiner	4
Gambar 1.4. Ilustrasi Sistem Terisolasi, Tertutup dan Terbuka	5
Gambar 1.5. Ilustrasi Sistem Tertutup	7
Gambar 1.6. Ilustrasi Sistem Terbuka	8
Gambar 1.7. Ilustrasi Bentuk-bentuk Energi	9
Gambar 1.8. Ilustrasi Properti dari Sistem	11
Gambar 1.9. Ilustrasi Proses	13
Gambar 1.10 Ilustrasi Siklus Operasi	13
Gambar 1.11. Ilustrasi Siklus Empat Proses dalam Diagram P-V	14
Gambar 2.1. Ilustrasi terjadinya kesetimbangan termal antara sistem A dan sistem B, akibat proses perpindahan panas dari sistem A yang memiliki suhu lebih tinggi ke sistem B yang suhunya lebih rendah	21
Gambar 2.2. Ilustrasi hukum ke nol termodinamika, berdasarkan konsep kesetimbangan termal	23
Gambar 4.1. Sistem Termodinamika	49
Gambar 4.2 Tiga Jenis Sistem Termodinamika	50
Gambar 4.3. Sistem Terbuka	51
Gambar 4.4. Sistem Tertutup	53
Gambar 4.5. Sistem Terisolasi	56
Gambar 5.1. Susunan Molekul (a) Padat, (b) Cair, dan (c) Gas	60
Gambar 5.2 . Perubahan Wujud Zat	63
Gambar 5.3 Kurva Perubahan Fase Air	69
Gambar 5.3 Diagram fase	72
Gambar 6.1 Eksperimen Joule tentang Ekuivalensi Mekanikal Kalor	78
Gambar 6.2 Ilustrasi Kalorimeter Air Sederhana	84
Gambar 6.3 Kalor Laten dan Perubahan Wujud Zat	85
Gambar 7.1 Transformasi fasa padat, cair, gas dan plasma	100
Gambar 7.2. Sinyal data dari DSC untuk penentuan kapasitas panas	104
Gambar 8.1 Grafik proses isothermal	114
Gambar 8.2 Grafik proses isobarik	118
Gambar 8.3 Grafik proses isokhorik	121
Gambar 10.1 Sadi Carnot (kiri) dan karyanya (kanan) yang menjelaskan tentang mesin panas dan siklusnya	152
Gambar 10.2 Panas berpindah dari secangkir kopi panas ke ruangan yang dingin	154
Gambar 10.3 Proses/siklus Carnot untuk gas ideal	160

Gambar 11.1 Ilustrasi suatu <i>microcanonical ensemble</i> yang terdiri dari dua buah <i>assembly</i> yang masing-masing memiliki energi sebesar ϵ , terdiri dari enam buah sistem, dan garis-garis biru yang mengilustrasikan dinding-dinding yang menghalangi perpindahan sistem dan energi ke <i>assembly</i> lain	170
Gambar 11.2 Contoh <i>canonical ensemble</i>	171
Gambar 11.3 Ilustrasi contoh kasus <i>grand canonical ensemble</i> : energi panas Q_{in} leluasa masuk ke dalam <i>assembly</i> , dan energi panas Q_{out} leluasa keluar <i>assembly</i> ; demikian juga sekumpulan partikel ΔN leluasa masuk ke dalam <i>assembly</i> dan keluar dari <i>assembly</i> ..	174
Gambar 11.4 Sudut solid $d\Omega = \sin \theta \, d\theta d\phi$	177
Gambar 11.5 Ilustrasi geometris tentang sekelompok atom yang mendekati elemen dA	179

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Titik beku dan titik didih air pada beberapa skala temperatur	39
Tabel 3.2 Beberapa persamaan untuk mengkonversikan skala temperatur.....	40
Tabel 5.1 Perbedaan antara Perubahan Fase dan Perubahan Wujud Zat	66
Tabel 6.1 Kalor jenis (pada tekanan 1 atm dan suhu 20°C)	81
Tabel 6.2 Nilai R	89
Tabel 7.1. Kapasitas panas spesifik beberapa zat pada temperatur kamar	95
Tabel 7.3 Kalor transformasi dari beberapa zat	101

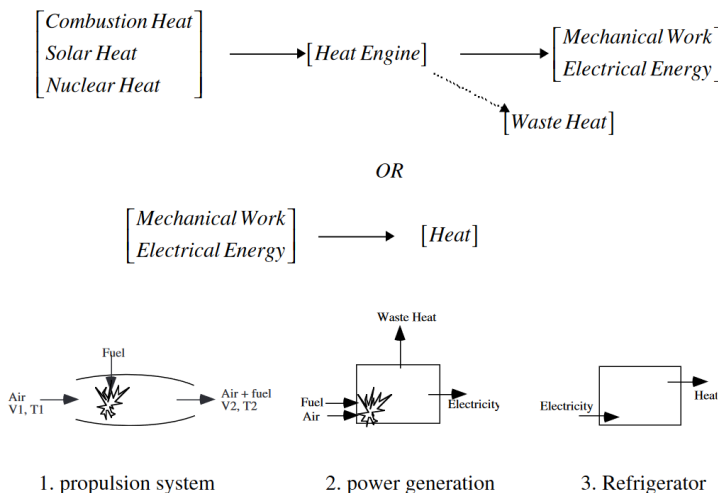
BAB 1

PENGANTAR TERMODINAMIKA

Oleh Analekta Tiara Perdana

1.1 Konsep Termodinamika

Termodinamika menggambarkan proses yang terlibat pada perubahan pada temperatur, transformasi energi serta hubungan antara panas dan kerja. Termodinamika juga merupakan alat yang penting untuk menggambarkan performa sistem propulsi, sistem penghasil energi, refrigerator, aliran air, pembakaran dan lain sebagainya. Ilustrasi ini disajikan pada Gambar 1.1 (Waitz, 2000)



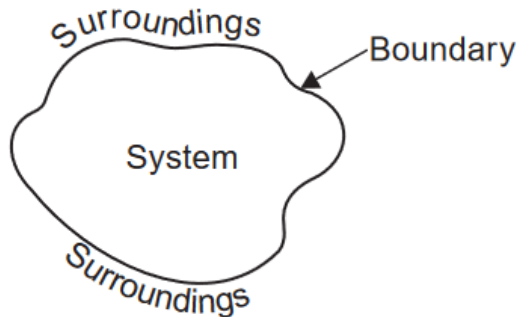
Gambar 1.1. Ilustrasi Termodinamika
(Sumber : Waitz, 2000)

Termodinamika dapat didefinisikan sebagai studi tentang energi, transformasi energi yang terlibat serta hubungannya dengan materi. Analisis sistem termal dapat dicapai melalui penerapan persamaan konservasi yang mengatur, yaitu: kekekalan massa, kekekalan energi (hukum pertama termodinamika), hukum kedua termodinamika berikut properti hubungannya. Energi dapat dipandang sebagai kemampuan untuk menyebabkan perubahan. Hukum pertama termodinamika merupakan salah satu hukum alam yang paling mendasar terkait prinsip kekekalan energi, yaitu selama interaksi, energi dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain tetapi jumlah total energi tetap konstan. Hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa energi memiliki kualitas maupun kuantitas dan aktual proses terjadi ke arah penurunan kualitas energi. Setiap kali ada interaksi antara energi dan materi, maka termodinamika akan terlibat (Hillert, 2012).

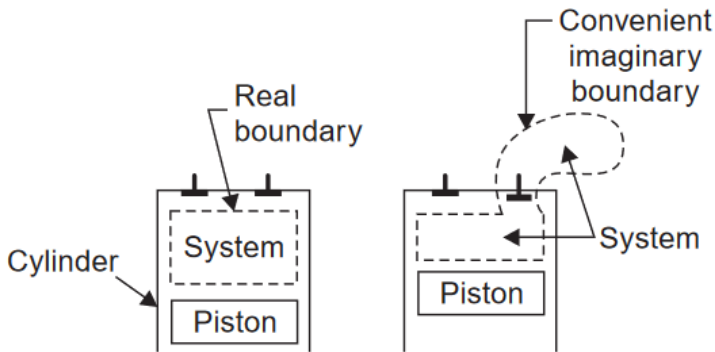
Awalnya, termodinamika adalah studi tentang panas dan kemampuannya untuk menghasilkan gerak, kemudian ia bergabung dengan subjek energi yang lebih besar dan interkonversinya dari satu bentuk ke bentuk yang lain. Seiring waktu, termodinamika berkembang menjadi teori yang menjelaskan tentang transformasi keadaan materi secara umum, gerak yang dihasilkan oleh panas menjadi sebuah konsekuensi dari transformasi tertentu. Hal ini pada dasarnya didasarkan pada dua dasar hukum, satu tentang energi dan entropi lainnya. Setiap sistem dikaitkan dengan energi dan entropi. Ketika materi mengalami transformasi dari satu keadaan ke keadaan lain, jumlah total energi dalam sistem dan bagian luarnya adalah tetap; entropi total, bagaimanapun, hanya dapat meningkat atau, pada kasus ideal, tetap tidak berubah (Kondepudi, 2008).

1.2 Sistem Termodinamika

Suatu sistem adalah jumlah materi yang terbatas atau wilayah ruang yang ditentukan (Gambar 1.2). *Boundary* adalah selubung aktual atau hipotetis yang melingkupi sistem. *Boundary* dapat tetap atau dapat bergerak, seperti dan ketika suatu sistem yang mengandung gas dikompresi atau diperluas. *Boundary* itu bisa nyata atau imajiner. Tidak sulit membayangkan *boundary* yang nyata tetapi contoh *boundary* yang imajiner adalah yang ditarik di sekitar sistem yang terhubung dengan sisa campuran segar akan memasuki silinder mesin I.C. bersama-sama dengan *remanants* dari muatan silinder terakhir setelah proses pembuangan (Gambar 1.3) (Rajput, 2007).

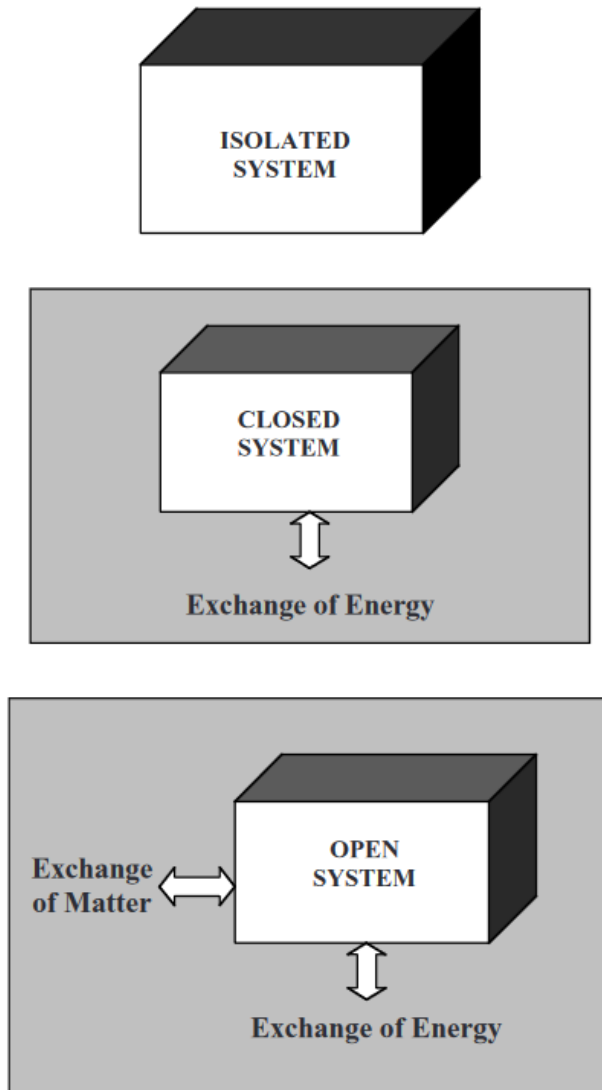


Gambar 1.2. Ilustrasi Sistem
(Sumber : Rajput, 2007)



Gambar 1.3. Ilustrasi *Boundary* Nyata dan Imajiner
(Sumber : Rajput, 2007)

Gambaran termodinamika dari proses alami biasanya dimulai dengan membagi dunia menjadi 'sistem' dan 'eksteriornya', yaitu bagian dunia lainnya. Ini tidak bisa dilakukan, tentu saja, ketika seseorang mempertimbangkan sifat termodinamika dari keseluruhan alam semesta namun, meskipun tidak ada 'eksterior', termodinamika dapat diterapkan ke seluruh alam semesta. Definisi sistem termodinamika tergantung pada keberadaan '*boundary*', *boundary* adalah batas-batas yang memisahkan sistem dari eksteriornya dan membatasi cara sistem berinteraksi dengan eksteriornya. Dalam memahami sifat termodinamika dari suatu sistem, cara pertukaran energi dan materi dengan eksteriornya, adalah penting. Oleh karena itu, sistem termodinamika diklasifikasikan menjadi tiga jenis: sistem terisolasi, tertutup dan terbuka (Gambar 1.4) menurut cara mereka berinteraksi dengan eksterior (Kondepudi, 2008).



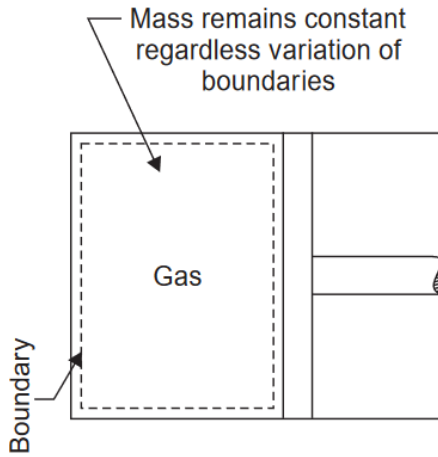
Gambar 1.4. Ilustrasi Sistem Terisolasi, Tertutup dan Terbuka
(Sumber : Kondepudi, 2008)

1.2.1 Sistem Terisolasi

Sistem terisolasi adalah sistem yang tidak menukar energi atau materi dengan apa pun sistem lain atau dengan lingkungan (Rajput, 2007). Sistem terisolasi tidak bertukar energi atau materi dengan eksterior. Sistem seperti itu umumnya dianggap untuk alasan pedagogis, sedangkan sistem dengan sangat lambat melakukan pertukaran energi dan materi di laboratorium. Kecuali secara keseluruhan, sistem yang benar-benar terisolasi tidak ada di alam (Kondepudi, 2008).

1.2.2 Sistem Tertutup

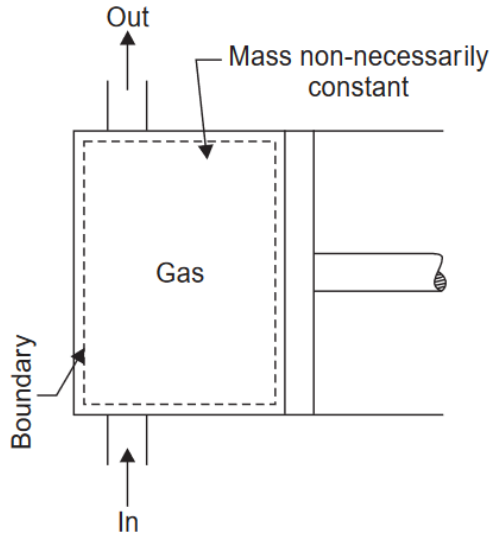
Jika batas sistem tidak dapat ditembus oleh aliran materi, itu adalah sistem tertutup. Contoh dari sistem ini adalah massa gas atau uap yang terkandung dalam sebuah mesin silinder, yang batasnya ditarik oleh dinding silinder, kepala silinder dan mahkota piston. Di sini batasnya kontinu dan tidak ada materi yang boleh masuk atau keluar (Gambar 1.5) (Rajput, 2007). Sistem tertutup bertukar energi tetapi tidak dengan bagian luarnya. Jelas bahwa sistem seperti itu dapat dengan mudah direalisasikan di laboratorium: Labu reaksi tertutup berisi bahan kimia yang dipertahankan pada suhu tetap adalah sistem tertutup. Bumi, pada skala waktu bertahun-tahun, saat ia bertukar materi dengan jumlah yang dapat diabaikan pada bagian luarnya, dapat dianggap sebagai sistem tertutup; yang hanya menyerap radiasi dari matahari dan memancarkannya kembali ke angkasa (Kondepudi, 2008).



Gambar 1.5. Ilustrasi Sistem Tertutup
(Sumber : Rajput, 2007)

1.2.3 Sistem Terbuka

Sistem terbuka adalah sistem yang memungkinkan materi mengalir masuk atau keluar dari sistem. Sebagian besar sistem teknik bersifat terbuka (Gambar 1.6) (Rajput, 2007). Sistem terbuka bertukar energi dan materi dengan bagian luarnya. Semua kehidupan dan sistem ekologi adalah sistem terbuka. Organisasi kompleks dalam sistem terbuka adalah hasil dari pertukaran materi dan energi dan menghasilkan entropi yang tidak dapat diubah proses yang terjadi di dalam (Kondepudi, 2008).

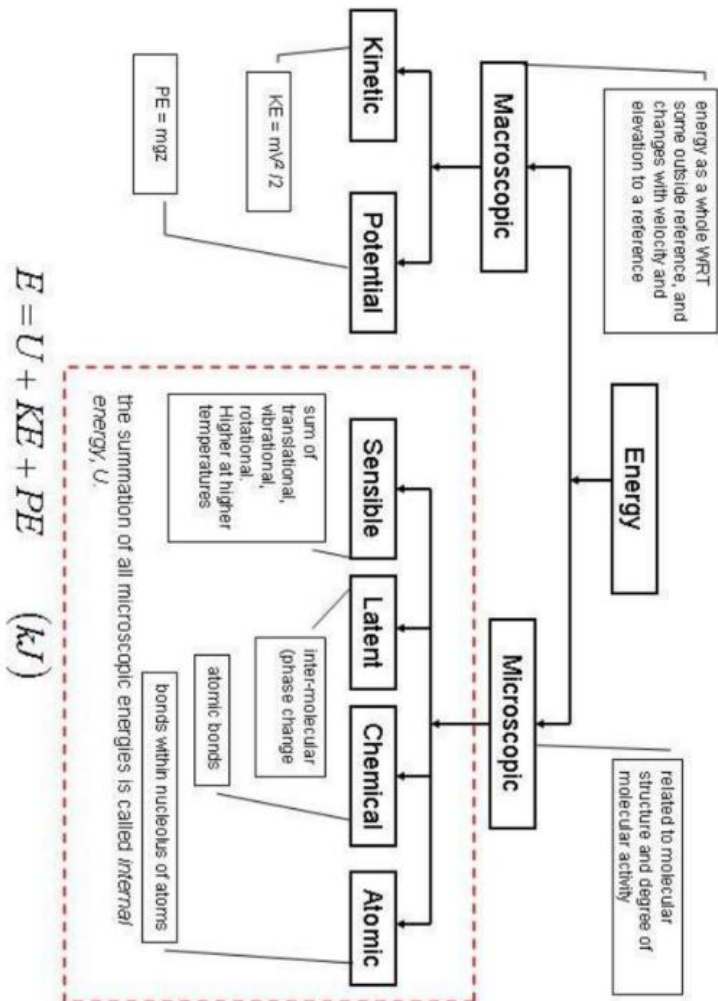


Gambar 1.6. Ilustrasi Sistem Terbuka
(Sumber : Rajput, 2007)

1.3 Energi

Dalam termodinamika, kita berurusan dengan perubahan energi total saja. Dengan demikian, energi total suatu sistem dapat diberi nilai nol pada beberapa titik referensi. Energi total suatu sistem memiliki dua kelompok: makroskopis dan mikroskopis. Bentuk energi makroskopik: bentuk energi yang dimiliki suatu sistem secara keseluruhan sehubungan dengan beberapa kerangka referensi luar, seperti energi kinetik dan potensial. Energi makroskopis suatu sistem terkait dengan gerak dan pengaruh beberapa efek eksternal seperti gravitasi, magnetisme, listrik, dan tegangan permukaan. Bentuk energi mikroskopis: adalah yang terkait dengan struktur molekul suatu sistem. Mereka tidak tergantung pada kerangka referensi luar. Jumlah energi mikroskopis disebut energi dalam, U . Interaksi energi dengan

sistem tertutup dapat terjadi melalui perpindahan panas dan kerja. Ilustrasi bentuk-bentuk energi disajikan pada Gambar 1.7 (Hillert, 2012).

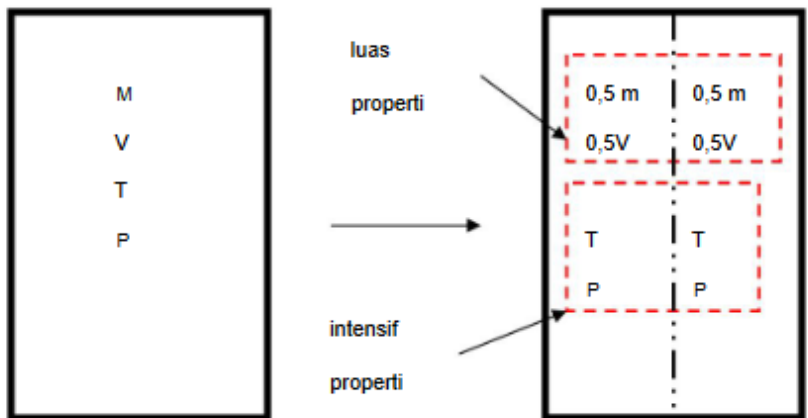


Gambar 1.7. Ilustrasi Bentuk-bentuk Energi
(Sumber : Hillert, 2012)

1.4 Properti dari Sistem

Setiap karakteristik dari suatu sistem disebut properti. Dalam termodinamika klasik, substansi dianggap sebagai sesuatu yang kontinu, materi dianggap homogen tanpa lubang mikroskopis. Asumsi ini berlaku selama volume dan skala panjang besar sehubungan dengan jarak antar molekul. Ilustrasi properti dari sistem disajikan pada Gambar 1.8 (Hillert, 2012). Properti dari sistem adalah karakteristik sistem yang tergantung pada keadaannya, tetapi bukan pada bagaimana keadaan itu dicapai. Terdapat dua jenis properti dari sistem (Rajput, 2007):

1. Sifat intensif: properti ini tidak bergantung pada massa sistem (tidak aditif). Contoh : suhu, tekanan dan kerapatan.
2. Sifat ekstensif. Properti ini tergantung pada massa sistem (tidak aditif). Contoh : volume dan energi total. Sifat ekstensif sering dibagi dengan massa yang terkait dengannya untuk mendapatkan sifat intensif. Sebagai contoh, jika volume suatu sistem bermassa m adalah V , maka volume spesifik dari materi dalam sistem adalah $v = \frac{V}{m}$ yang merupakan sifat intensif.



Gambar 1.8. Ilustrasi Properti dari Sistem
(Sumber : Hillert, 2012)

1.5 Proses dan Siklus

1.5.1 Proses

Suatu proses terjadi ketika sistem mengalami perubahan keadaan atau perpindahan energi pada keadaan stabil. Suatu proses mungkin bersifat *non-flow* yaitu dengan massa yang tetap dalam batas yang ditentukan kemudian mengalami perubahan keadaan. Contoh : Suatu zat yang dipanaskan dalam silinder tertutup mengalami proses *non-flow*. Sistem tertutup mengalami proses *non-aliran*. Sebuah proses mungkin termasuk *flow process* saat massa masuk dan keluar melalui batas sistem terbuka. Dalam *flow process*, massa melintasi batas dari lingkungan pada saat masuk, dan massa yang sama melintasi batas di pintu keluar sehingga massa total sistem tetap konstan. Dalam sistem terbuka perlu untuk memperhitungkan pekerjaan yang disampaikan dari lingkungan ke sistem saat masuk untuk menyebabkan massa masuk, dan juga kerja yang dikirim dari sistem di sekitarnya

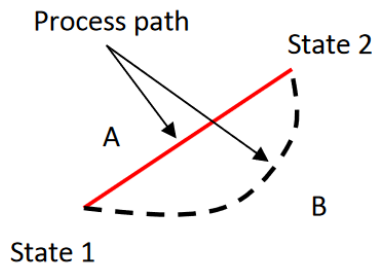
menyebabkan massa pergi, serta setiap panas atau pekerjaan yang melintasi batas sistem. Proses kuasistatis. kuasi berarti 'hampir'. Sebuah proses kuasistatis juga disebut proses reversibel. Proses ini adalah suksesi keadaan kesetimbangan dan kelambatan tak terbatas (Rajput, 2007).

Setiap perubahan yang dialami sistem dari satu keadaan setimbang ke keadaan setimbang lainnya disebut proses, dan rangkaian keadaan yang dilalui sistem selama proses disebut jalur. Ilustrasi proses disajikan pada Gambar 1.9. Proses kuasi-ekuilibrium: dapat dilihat sebagai proses yang cukup lambat yang memungkinkan sistem untuk menyesuaikan dirinya sendiri secara internal dan tetap sangat dekat dengan keadaan ekuilibrium setiap saat. Proses kuasi-ekuilibrium adalah proses yang diidealkan dan bukan representasi sebenarnya dari proses yang sebenarnya. Proses aktual dengan kuasi-ekuilibrium dapat dimodelkan. Selain itu, dapat juga berfungsi sebagai standar saat proses aktual dapat dibandingkan. Diagram proses digunakan untuk memvisualisasikan proses. Perhatikan bahwa jalur proses menunjukkan serangkaian keadaan kesetimbangan, dan tidak dapat menentukan keadaan untuk proses non-kuasi-kesetimbangan (Hillert, 2012).

1.5.2 Siklus

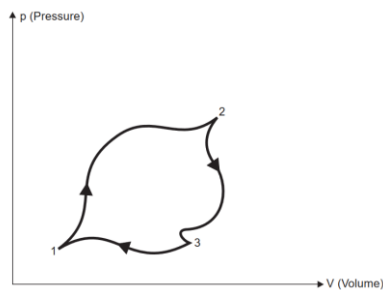
Setiap proses atau rangkaian proses yang keadaan akhirnya identik disebut siklus. Proses yang dilalui sistem dapat ditampilkan pada diagram keadaan (*state diagram*), tetapi bagian lengkap dari jalur tersebut memerlukan tambahan pernyataan dari panas dan kerja saat melintasi batas sistem. Gambar 1.10 menunjukkan siklus saat sistem yang dimulai pada kondisi '1' berubah pada tekanan dan

volume melalui jalur 123 dan kembali ke kondisi awal '1' (Rajput, 2007).

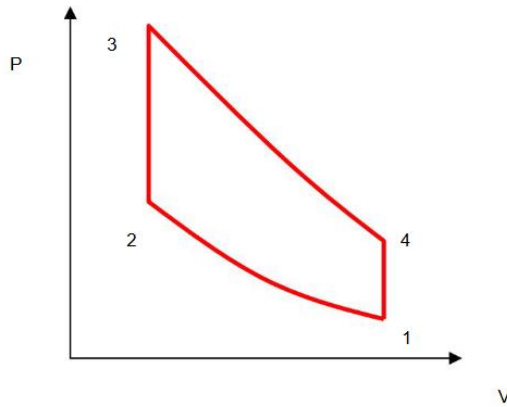


Gambar 1.9. Ilustrasi Proses
(Sumber : Hillert, 2012)

Suatu sistem dikatakan telah mengalami siklus jika kembali ke keadaan awal pada akhir siklus proses. Keadaan sistem dijelaskan oleh sifat-sifatnya. Keadaan sistem kompresibel sederhana sepenuhnya ditentukan oleh dua sifat intensif dan independen Suatu sistem disebut sistem kompresibel sederhana jika tidak ada efek listrik, magnet, gravitasi, gerak, dan tegangan permukaan (medan gaya eksternal). Properti independen: dua properti independen jika satu properti dapat diubah sementara yang lain tetap konstan (Gambar 1.11) (Hillert, 2012).



Gambar 1.10 Ilustrasi Siklus Operasi
(Sumber : Rajput, 2007)



Gambar 1.11. Ilustrasi Siklus Empat Proses dalam Diagram P-V
(Sumber : Hillert, 2012)

1.6 Kestimbangan Termodinamika

Pada keadaan tertentu, semua properti sistem memiliki nilai tetap. Jadi, jika nilai dari satu properti saja berubah, status akan berubah menjadi properti yang berbeda. Dalam keadaan ekuilibrium, tidak ada potensi yang tidak seimbang (atau gaya penggerak) di dalam sistem. Suatu sistem dalam kesetimbangan tidak mengalami perubahan ketika diisolasi dari lingkungannya (Hillert, 2012).

Suatu sistem dalam kesetimbangan termodinamika jika suhu dan tekanan di semua titik adalah sama; seharusnya tidak ada gradien kecepatan; kesetimbangan kimia juga diperlukan. Sistem di bawah kesetimbangan suhu dan tekanan tetapi tidak di bawah kesetimbangan kimia adalah kadang-kadang dikatakan dalam kondisi kesetimbangan metastabil. Itu hanya di bawah persamaan termodinamika kondisi librium bahwa sifat-sifat suatu sistem dapat

diperbaiki. Jadi untuk mencapai keadaan kesetimbangan termodinamika, tiga jenis persamaan berikut keadaan librium harus dicapai (Rajput, 2007):

1. Kesetimbangan termal: suhu sistem tidak berubah terhadap waktu dan memiliki nilai yang sama di semua titik sistem;
2. Kesetimbangan mekanik: tidak ada kekuatan yang tidak seimbang di dalam sistem atau di lingkungan. Tekanan dalam sistem sama di semua titik dan tidak berubah terhadap waktu;
3. Kesetimbangan kimia: tidak ada reaksi kimia yang terjadi dalam sistem dan komposisi kimia yang sama di seluruh sistem tidak berubah terhadap waktu.

Jika sistem fisik diisolasi, keadaannya akan ditentukan oleh variabel makroskopik seperti tekanan, suhu dan komposisi kimia yang berkembang secara ireversibel menuju keadaan waktu-invarian ketika tidak dapat lagi terlihat perubahan fisika atau kimia. Hal ini merupakan keadaan kesetimbangan termodinamika yang ditandai dengan suhu yang seragam di seluruh sistem. Keadaan keseimbangan juga dicirikan oleh beberapa ciri fisik lain. Evolusi suatu sistem menuju keadaan kesetimbangan disebabkan oleh proses ireversibel, seperti konduksi panas dan reaksi kimia, yang bertindak pada arah yang spesifik tetapi bukan sebaliknya. Misalnya, panas selalu mengalir dari tempat yang lebih tinggi suhunya ke tempat yang lebih rendahnya, keadaan ini tidak pernah dalam arah sebaliknya; demikian pula, reaksi kimia menyebabkan perubahan komposisi dalam arah tertentu bukan kebalikannya. Pada kesetimbangan, proses ini menghilang. Dengan demikian, keadaan nonekuilibrium dapat terjadi dicirikan sebagai keadaan saat proses

ireversibel sedang berlangsung membawa sistem menuju keadaan setimbang. Dalam beberapa situasi, terutama selama transformasi kimia, keadaan dapat berubah secara ireversibel mungkin sangat kecil, dan sistem yang terisolasi mungkin muncul seolah-olah itu adalah *time invariant* dan telah mencapai keadaan setimbang. Namun demikian, dengan spesifikasi reaksi kimia yang sesuai, sifat nonekuilibrium dapat diidentifikasi. Dua atau lebih sistem yang berinteraksi dan bertukar energi dan/atau materi pada akhirnya akan bersama-sama mencapai keadaan kesetimbangan termal saat suhu di dalam masing-masing sistem spasial seragam dan suhu semua sistem adalah sama. Jika sistem A berada dalam kesetimbangan termal dengan sistem B dan jika B berada dalam kesetimbangan termal dengan sistem C, maka A berada dalam kesetimbangan termal dengan C. Dengan demikian, kesetimbangan ekuilibrium memiliki suhu seragam spasial yang terdefinisi dengan baik (Kondepudi, 2008).

DAFTAR PUSTAKA

- Hillert, M. (2012) 'Basic concepts of thermodynamics', *Phase Equilibria, Phase Diagrams and Phase Transformations*, 388(F 09), pp. 1–29. Available at:
<https://doi.org/10.1017/cbo9780511812781.003>.
- Kondepudi, D. (2008) *Introduction to Modern Thermodynamics*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Rajput, R.K. (2007) *THERMODYNAMICS*. Third Edit. New Delhi: Laxmi Publication (P) LTD.
- Waitz, I. a (2000) 'THERMODYNAMICS: Course Learning Objectives', pp. 1–52.

BAB 2

Hukum Ke-0 Termodinamika

Oleh Jannes Bastian Selly

2.1 Pendahuluan

Termodinamika telah menjadi bagian yang tak terpisahkan dari kehidupan modern saat ini. Penerapan termodinamika memudahkan kita untuk dapat bepergian menggunakan kendaraan, tanpa mengeluarkan energi yang besar, kita dapat duduk dengan nyaman di ruangan ber-AC atau menikmati minuman dingin dari lemari pendingin.

Termodinamika adalah cabang ilmu pengetahuan yang mempelajari tentang konsep panas dan suhu serta hubungannya dengan bentuk energi lain (Masruroh and Nuriyah, 2021). Termodinamika dipelajari di berbagai bidang sains seperti fisika, kimia, maupun teknik mesin, karena manfaatnya yang besar.

Hampir semua proses yang terjadi di alam semesta disertai dengan perubahan energi. Perubahan energi dapat dimanifestasikan dalam berbagai bentuk seperti energi mekanik, energi listrik dan lain sebagainya. Dengan demikian, melalui termodinamika, kita mengetahui cara untuk menggambarkan atau mengkarakterisasikan perubahan energi dalam setiap reaksi (Masruroh and Nuriyah, 2021; Lulut, 2022).

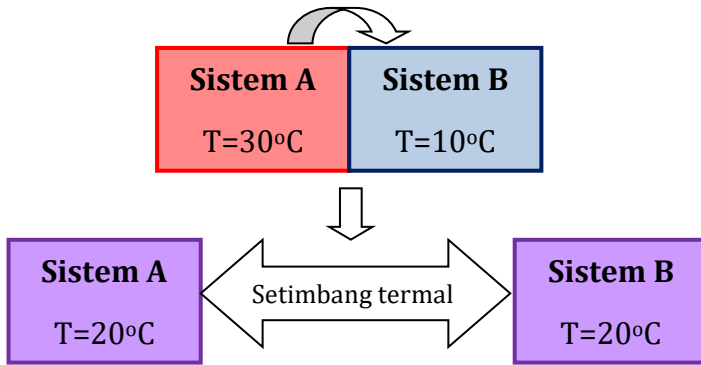
Dalam termodinamika, terdapat empat hukum yang berlaku secara universal (Borgnakke and Sonntag, 2009; Klein and Nellis, 2012). Hukum pertama termodinamika menyatakan bahwa energi total di alam semesta selalu konstan. Hukum ini dikenal sebagai hukum kekekalan energi. Hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa perpindahan energi panas secara alami terjadi dari sistem yang memiliki suhu lebih tinggi ke sistem yang suhunya lebih rendah. Hal ini tidak dapat dibalik, kecuali dengan menambahkan energi. Hukum ketiga termodinamika menyatakan bahwa ketidakteraturan dalam suatu sistem dapat ditiadakan atau dihilangkan ketika sistem tersebut mencapai suhu nol mutlak ($0 \text{ K} = -273^\circ\text{C}$).

Ketiga hukum ini dirumuskan dan ditetapkan lebih dahulu tanpa disadari bahwa ada besaran fisis suhu yang terlewatkan dan belum diketahui. Konsep mengenai suhu dan kesetimbangannya kemudian dirumuskan dalam sebuah hukum baru yang dikenal sebagai hukum nol termodinamika, yang akan dipelajari lebih jelas dalam bab ini.

2.2 Kesetimbangan termal (*thermal equilibrium*)

Sebelum mengenal hukum nol termodinamika, terlebih dahulu harus dipahami konsep kesetimbangan termal. Kesetimbangan termal menyatakan bahwa apabila terdapat dua sistem yang masing-masing dibatasi oleh membran (pembatas) yang hanya memungkinkan panas untuk berpindah tanpa disertai materi (sistem tertutup), maka akan terjadi perpindahan panas dari sistem yang suhunya lebih tinggi, menuju ke sistem yang suhunya lebih rendah, hingga kedua sistem memiliki suhu yang sama (Cengel, 2003;

Borgnakke and Sonntag, 2009; Masruroh and Nuriyah, 2021). Proses ini diilustrasikan dalam Gambar 2.1 berikut



Gambar 2.1. Ilustrasi terjadinya kesetimbangan termal antara sistem A dan sistem B, akibat proses perpindahan panas dari sistem A yang memiliki suhu lebih tinggi ke sistem B yang suhunya lebih rendah

Aliran energi panas akan terus terjadi selama kedua sistem masih memiliki perbedaan suhu. Ketika kedua sistem telah mencapai suhu yang sama, maka aliran energi panas dengan sendirinya akan berhenti. Keadaan ini yang disebut sebagai kesetimbangan termal (Masruroh and Nuriyah, 2021; Lulut, 2022). Konsep kesetimbangan termal ini yang kemudian menjadi dasar dalam merumuskan hukum nol termodinamika.

2.2 Suhu dan Hukum Nol Termodinamika

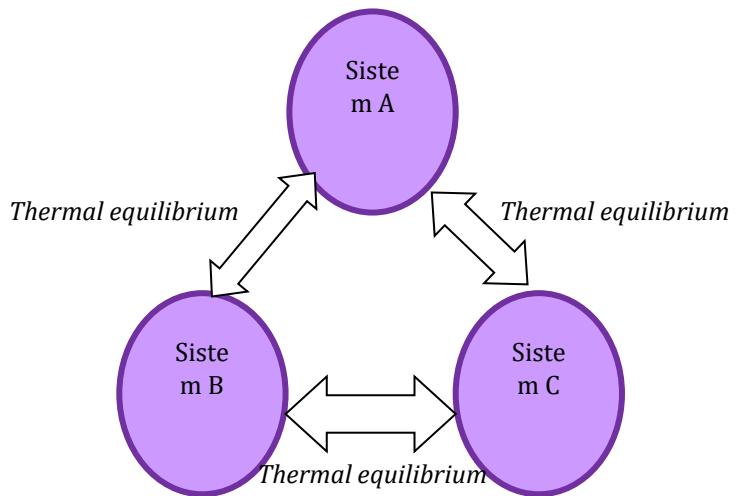
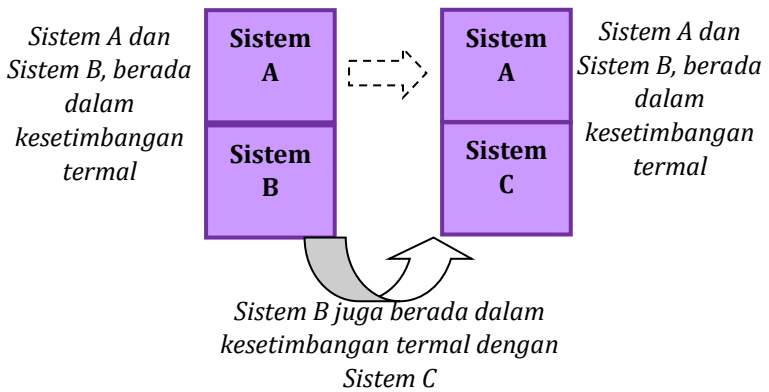
Suhu merupakan besaran fisis yang fundamental dalam perkembangan ilmu termodinamika. Besaran suhu dapat didefinisikan secara pasti melalui perhitungan matematis

dalam hukum nol termodinamika. Berikut uraian mengenai hukum ke nol termodinamika

2.2.1 Konsep dasar perumusan hukum nol termodinamika

Berdasarkan konsep kesetimbangan termal yang telah dijelaskan di bagian sebelumnya, dikembangkan pemikiran lanjutan yang dikenal sebagai hukum nol termodinamika.

Hukum nol termodinamika menyatakan bahwa apabila terdapat dua sistem misalnya sistem A dan B yang saling bersentuhan, dan masing-masing berada dalam kesetimbangan termal satu sama lain, kemudian sistem A ditempatkan bersinggungan dengan sistem ketiga, sistem C, dan hasil observasi menunjukkan bahwa sistem A dan sistem C memiliki kesetimbangan termal, maka dapat dipastikan bahwa sistem B juga berada dalam kesetimbangan termal dengan sistem C, meskipun tanpa melakukan kontak (bersinggungan). Dengan kata lain, ketiga sistem ini berada dalam kesetimbangan termal, baik sistem A dengan sistem B, sistem B dengan sistem C, maupun sistem C dengan sistem A (Klein and Nellis, 2012). Secara matematis, konsep sederhananya adalah, jika $A=B$, dan $A=C$, maka dapat dipastikan bahwa $B=C$, sehingga $A=B=C$. Hukum nol termodinamika secara lebih jelas diilustrasikan dalam Gambar 2.2 berikut



Gambar 2.2. Ilustrasi hukum ke nol termodinamika, berdasarkan konsep kesetimbangan termal.

2.2.2 Asal mula penamaan hukum nol termodinamika

Konsep mengenai kesetimbangan termal antara sistem, yang kemudian menjadi dasar perumusan hukum nol termodinamika. dikembangkan bertahun-tahun kemudian setelah hukum pertama, kedua, dan ketiga termodinamika dirumuskan dan telah diterima secara luas di seluruh dunia(Atkins, 2010).

Meskipun demikian hukum ini menjelaskan tentang aspek fundamental dari ketiga hukum yang telah ada sebelumnya, dengan demikian, secara penomoran, hukum ini tidak bisa dituliskan sebagai hukum ke-empat termodinamika. Namun, apabila hukum ini dituliskan sebagai hukum pertama, sedangkan hukum pertama sebelumnya berubah menjadi hukum kedua dan seterusnya, maka berpotensi dapat menimbulkan kekacauan literatur antara hukum-hukum termodinamika. Hukum pertama hingga hukum ketiga termodinamika telah diterima dan digunakan dalam kajian-kajian ilmiah saat itu, oleh karena itu, untuk menghindari kekacauan literatur pada penomoran hukum-hukum termodinamika, maka Ralph H. Fowler, seorang fisikawan berkebangsaan Inggris memberikan solusi untuk menamakan hukum kesetimbangan termal ini sebagai hukum 0 termodinamika, yang kemudian digunakan hingga saat ini(Atkins, 2010).

Hukum nol termodinamika kemudian menjadi landasan untuk mendefinisikan suhu secara matematis serta pengukurannya menggunakan alat ukur tertentu. Untuk membandingkan suhu sebuah benda secara akurat, maka diperlukan benda referensi yang memiliki karakteristik berubah terhadap suhu. Konsep hukum nol termodinamika kemudian dijadikan sebagai landasan untuk menciptakan alat ukur suhu yaitu thermometer (Mikoley, 2021). Jenis-

jenis thermometer, prinsip kerja serta skala suhunya dijelaskan dalam bagian selanjutnya.

2.3 Aplikasi Hukum Nol Termodinamika

Dalam kehidupan sehari-hari istilah panas atau dingin sudah sangat lazim digunakan. Sebuah obyek dikatakan panas jika suhunya tinggi, sebaliknya obyek tersebut dikatakan dingin ketika suhunya rendah. Alat ukur atau instrumen untuk mengukur suhu adalah termometer. Prinsip kerja termometer menggunakan hukum nol termodinamika. Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai aplikasi hukum nol termodinamika, khususnya skala pengukuran pada termometer serta jenis-jenis termometer.

2.3.1 Prinsip dasar pengukuran suhu

Prinsip dasar pengukuran suhu menggunakan hukum nol termodinamika, yaitu prinsip kesetimbangan termal. Obyek yang akan diukur dihubungkan dengan obyek lain yang berperan sebagai alat ukur. Ketika obyek yang diukur memiliki suhu lebih tinggi, maka panas akan berpindah dari obyek yang diukur ke alat ukur sampai terjadi kesetimbangan termal. Pada saat terjadi kesetimbangan termal, maka suhu obyek sama dengan suhu alat ukur. Pada alat ukur telah disediakan skala ukur. Sehingga pada saat terjadi kesetimbangan termal, suhu obyek yang diukur dapat terbaca oleh alat ukur (Mikoley, 2021).

Terdapat berbagai jenis termometer sebagai alat ukur suhu yang kita kenal saat ini, mulai dari yang paling sederhana, hingga yang paling canggih. Beberapa jenis termometer akan dibahas pada bagian selanjutnya

2.3.2 Jenis-jenis termometer

a. Termometer raksa

Termometer raksa merupakan jenis termometer yang paling banyak digunakan untuk mengukur suhu tubuh. Cara pakai termometer ini adalah dengan dimasukkan ke dalam bagian tubuh tertentu, pada umumnya mulut atau ketiak. Ketika berinteraksi dengan obyek yang diukur, akan terjadi perpindahan panas yang menyebabkan peningkatan atau penurunan suhu. Perubahan ini akan mempengaruhi raksa dalam tabung kaca termometer(Mikoley, 2021).

Ketika suhu meningkat, maka raksa akan memuai di dalam tabung. Makin tinggi suhu, makin besar pula volume raksa dalam tabung, sehingga raksa akan naik dan menunjuk pada skala yang tinggi. Sebaliknya jika suhu obyek yang diukur rendah maka akan terjadi perpindahan suhu dari termometer ke obyek ukur yang membuat raksa menyusut volumenya dan turun ke skala yang rendah (Mikoley, 2021).

Meskipun mudah dalam penggunaannya, thermometer raksa saat ini sudah tidak digunakan secara umum lagi untuk mengukur suhu tubuh, karena tabung kaca thermometer yang rentan pecah, sehingga dapat menyebabkan raksa terkena kulit tubuh dan menyebabkan iritasi (Mikoley, 2021).

b. Termometer digital

Jenis lain dari termometer adalah termometer digital, yang saat ini sangat sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari menggantikan termometer raksa. Termometer digital memiliki komponen pengukur suhu yang sangat akurat. Selain akurasinya yang tinggi, termometer digital juga memiliki harga

yang terjangkau untuk masyarakat umum (Mikoley, 2021).

Termometer digital mampu mendeteksi suhu tertentu dengan menggunakan sensor. Saat digunakan untuk mengukur suhu suatu benda, tegangan kaki pada output sensor termometer akan berubah. Perubahan tersebut kemudian dikonversikan menjadi angka yang selanjutnya menunjukkan nilai dari suhu yang diukur (Mikoley, 2021).

c. Termometer Inframerah

Termometer inframerah memiliki perbedaan yang mendasar dengan jenis termometer raksa maupun termometer digital. Perbedaannya adalah, pada termometer inframerah tidak memakai prinsip perambatan panas secara konduksi, melainkan melalui radiasi (Boyes, 2009).

Teori dalam ilmu fisika kedokteran, semua jenis zat dan benda yang temperaturnya di atas 0 kelvin mampu memancarkan radiasi elektromagnetik. Radiasi inilah yang kemudian akan ditangkap oleh termometer inframerah dan ditunjukkan pada layar sebagai nilai suhu dari obyek yang diukur (Boyes, 2009).

d. Termometer elektronika

Dibidang elektronika, terdapat sebuah termometer yang dikenal sebagai termokopel (*thermocouple*). termokopel merupakan sensor suhu dan sering digunakan untuk mencari perbedaan suhu di dalam suatu benda. Perbedaan suhu yang diidentifikasi kemudian diubah menjadi tegangan listrik (Boyes, 2009; Mikoley, 2021).

Termokopel terdiri dari beberapa jenis yang dibedakan berdasarkan bahan pembuatnya dan rentang suhu yang dapat diukur. Misalnya termokopel

tipe K, merupakan sensor suhu yang terbuat dari bahan logam nikel-chromium pada konduktor positif, dan nikel-aluminium pada konduktor negatifnya. Termokopel tipe K, mampu mengukur suhu pada rentang -200°C hingga 1250°C (Boyes, 2009).

e. Termometer bimetal mekanik

Termometer bimetal terdiri dari bimetal strip yang dibentuk dengan menggabungkan dua logam yang berbeda serta memiliki koefisien ekspansi termal yang berbeda pula. Strip bimetal adalah elemen mekanik yang dapat merasakan suhu dan mengubahnya menjadi perpindahan mekanis. Aktivitas mekanis dari strip bimetal dapat digunakan untuk mengaktifkan mekanisme switching untuk mendapatkan output elektronik (Mikoley, 2021).

Prinsip kerja termometer ini dilandasi oleh fenomena bahwa dua logam yang berbeda akan berperilaku dengan cara yang berbeda ketika terkena variasi suhu karena tingkat ekspansi termal yang berbeda. Satu lapis logam mengembang atau berkontraksi lebih dari lapisan logam lainnya dalam susunan bimetalik yang menghasilkan perubahan lentur atau kelengkungan pada lajur (Mikoley, 2021).

2.3.3 Skala pengukuran suhu

Terdapat empat jenis skala pengukuran yang digunakan saat ini, yaitu skala Fahrenheit, Reamur, Celcius, dan Kelvin. Berikut penjelasan mengenai keempat skala pengukuran suhu tersebut.

a. Skala Fahrenheit

Daniel Gabriel Fahrenheit (1686–1736), merupakan seorang fisikawan berkebangsaan Jerman.

Fahrenheit menemukan skala pengukuran suhu pada tahun 1724 yang dikenal dengan skala fahrenheit dan memiliki satuan derajat Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$). Beliau bukanlah orang pertama yang mencoba menemukan alat ukur suhu dan merumuskan skala pengukuran suhu. Fahrenheit mengembangkan thermometer yang dirancang oleh Ferdinan II (Lin, 2012).

Termometer rancangan Ferdinan II merupakan thermometer tertutup pertama yang dikembangkan tahun 1654. Termometer yang ia buat tersebut menggunakan cairan dalam kaca. Cairan yang digunakan dalam tabung kaca adalah alkohol. Alkohol dalam thermometer belum memberikan nilai yang akurat saat pengukuran suhu, selain itu thermometer rancangan Ferdinan II ini belum memiliki skala standar (Lin, 2012).

Kelemahan thermometer rancangan Ferdinan II inilah yang kemudian diperbaiki oleh Fahrenheit. Pengembangan yang dilakukan Fahrenheit adalah mengganti alkohol yang digunakan sebelumnya dengan raksa (Hg). Pemilihan raksa didasari atas pertimbangan sifat raksa yang stabil dan tidak mudah menguap (Lin, 2012).

Pada tahun 1724, Fahrenheit kemudian mempublikasikan skala suhu standar sehingga dapat menghitung perubahan suhu sebuah obyek dengan akurat. Termometer skala Fahrenheit memiliki titik didih air 212°F dan titik bekunya 32°F . Rentang temperaturnya berada pada temperatur $32^{\circ}\text{F} - 212^{\circ}\text{F}$ dan dibagi dalam 180 skala (Lin, 2012).

b. Skala Reamur

Rene Antoine Ferchault de Reamur (1683-1757) adalah seorang ilmuwan yang berasal dari Perancis. Ia menjadi salah satu bagian perkembangan termometer di dunia dengan menentukan skala termometer berdasarkan titik beku dan titik didih air. Termometer skala reamur memiliki satuan derajat reamur ($^{\circ}\text{R}$) dengan titik didih air 80°R dan titik bekunya 0°R . Rentang temperaturnya berada pada temperatur $0^{\circ}\text{R} - 80^{\circ}\text{R}$ dan dibagi dalam 80 skala (Boyes, 2009).

c. Skala Celcius

Anders Celcius (1701-1744) merupakan seorang astronom dari Swedia. Pada tahun 1743, ia menciptakan skala suhu termometer yang kemudian ditetapkan dengan sebutan Celcius ($^{\circ}\text{C}$). Skala suhu yang diciptakan oleh Anders Celcius ini menetapkan titik beku air pada suhu 0°C dan titik didihnya pada suhu 100°C di tekanan atmosfer standar (Lin, 2012). Skala ini pun banyak digunakan oleh masyarakat luas, termasuk di Indonesia.

d. Skala Kelvin

Lord Kelvin (1824-1907) merupakan seorang ilmuwan berkebangsaan Inggris yang menjadi ilmuwan terakhir yang berperan dalam perkembangan termometer. Ia merupakan orang pertama yang memberikan usulan skala mutlak dari suhu. Usai skala Celcius ditemukan, Lord Kelvin menciptakan skala baru (Boyes, 2009).

Skala ini merupakan hasil dari perkembangan gagasan suhu mutlak atau dikenal sebagai hukum kedua termodinamika. Skala ini dinamai dengan Kelvin (K), dimana skala Kelvin memiliki titik didih air $373,15\text{ K}$ dan titik bekunya $273,15\text{ K}$. Rentang temperaturnya

berada pada temperatur 273,15 K – 373,15 K dan dibagi dalam 100 skala. Sampai saat ini skala Kelvin menjadi skala yang digunakan dalam sistem internasional untuk besaran suhu (Boyes, 2009).

Secara matematis perbandingan keempat skala tersebut, dijelaskan sebagai berikut

$$\frac{{}^{\circ}C - 0}{100} = \frac{{}^{\circ}R - 0}{80} = \frac{{}^{\circ}F - 32}{180} = \frac{K - 273}{373} \quad (2.1)$$

Persamaan ini mempermudah dalam menghitung konversi antara satu skala dengan skala lainnya. Sebagai contoh, untuk melakukan konversi skala reamur ke celcius digunakan persamaan

$$\begin{aligned} \frac{{}^{\circ}C - 0}{100} &= \frac{{}^{\circ}R - 0}{80} \\ \frac{{}^{\circ}C}{100} &= \frac{{}^{\circ}R}{80} \\ \frac{{}^{\circ}C}{{}^{\circ}R} &= \frac{5}{4} \end{aligned}$$

Dengan demikian, jika ingin menkonversi nilai suhu dari skala reamur ke celcius digunakan persamaan (2.2). Sebaliknya untuk mengkonversi nilai suhu dari skala celcius ke reamur digunakan persamaan (2.3)

$${}^{\circ}C = \frac{5}{4} {}^{\circ}R \quad (2.2)$$

$${}^{\circ}R = \frac{4}{5} {}^{\circ}C \quad (2.3)$$

Konversi antar keempat skala pengukuran suhu secara jelas disajikan dalam Tabel 2.1 berikut (Equity, 2016)

Tabel 2.1. Konversi nilai keempat skala pengukuran suhu

Skala awal	Skala konversi			
	Celcius (°C)	Reamur (°R)	Fahrenheit (°F)	Kelvin (K)
Celcius (°C)		$\frac{4}{5} ^\circ C$	$\frac{9}{5} ^\circ C + 32$	$^\circ C + 273$
Reamur (°R)	$\frac{5}{4} ^\circ R$		$\frac{9}{4} ^\circ R + 32$	$\frac{5}{4} ^\circ R + 273$
Fahrenheit (°F)	$\frac{5}{9} (^\circ F - 32)$	$\frac{4}{9} (^\circ F - 32)$		$\frac{5}{9} ^\circ F + 459.4$
Kelvin (K)	$K - 273$	$\frac{4}{5} (K - 273)$	$\frac{9}{5} K - 459.4$	

DAFTAR PUSTAKA

- Atkins, P. (2010) *The Laws of Thermodynamics*. Oxford: OUP Oxford.
- Borgnakke, C. and Sonntag, R. E. (2009) *Fundamentals of Thermodynamics Seventh edition*. Seventh. Michigan: John Wiley & Sons, Inc.
- Boyes, W. (ed.) (2009) 'Temperature Measurement', in *Instrumentation Reference Book*. Elsevier Science.
- Cengel, Y. A. (2003) *Thermodynamics: Heat transfer a practical approach*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Equity, A. O. from T. (2016) 'Temperature, Kinetic Theory, and The Gas Laws', in *College Physics Textbook Equity Edition Volume 2*. London.
- Klein, S. and Nellis, G. (2012) *Thermodynamics*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Lin, Y. (2012) *Fahrenheit, Celcius, and Their Temperature Scale*. Edited by A. V. Zumbusch. New York, USA: The Rosen Publishing Group, Inc.
- Lulut, A. (2022) 'Konsep Dasar Sistem Termodinamika', in Pido, R. (ed.) *Termodinamika: Tinjauan Teoritis dan Praktis*. Indie Press, p. 2.
- Masruroh and Nuriyah, L. (2021) *Termodinamika: Tinjauan Sains dan Rekayasa*. Malang, Indonesia: UB Press.
- Mikoley, K. (2021) *How Do Thermometers Work?* 1st edn. Edited by S. Saidian. New York, USA: The Rosen Publishing Group, Inc.

BAB 3

KONSEP TEMPERATUR

Oleh Erwin Randjawali

3.1 Pendahuluan

Temperatur merupakan salah satu dari tujuh besaran pokok SI yang sering didengar dalam kehidupan sehari-hari. Temperatur juga dikenal sebagai ukuran seberapa dingin atau panasnya sebuah obyek (Giancoli, 2014; Tipler, 1998; Walker dkk., 2014). Definisi yang lebih tepat dari temperatur adalah ukuran energi kinetik molekuler yang terdapat di dalam sebuah benda (Tipler, 1998). Pada dasarnya, temperatur merupakan salah satu besaran fisika yang dipelajari dalam termodinamika, yang merupakan sebuah ilmu yang mengkaji terkait temperatur, panas, serta transfer energi. Selain itu, temperatur bahkan merupakan sebuah konsep yang utama dalam termodinamika (Walker dkk., 2014). Dari penjelasan di atas, maka dapat disimpulkan bahwa konsep temperatur perlu dikuasai dengan baik agar dapat mempelajari termodinamika. Oleh karena itu, pada bab ini akan dibahas terkait konsep temperatur.

Termodinamika diterapkan dalam banyak aspek kehidupan sehari-hari, misalnya dalam aktivitas memasak, kondisi cuaca, dan lain-lain (Tipler, 1998). Bahkan sejak kecil seseorang telah dibekali dengan pengetahuan terkait energi termal dan temperatur. Sebagai contoh, pengaturan

temperatur udara di dalam rumah maupun mobil. Contoh lainnya adalah seseorang akan berhati-hati dengan makanan yang panas, serta menyimpan bahan makanan yang mudah rusak ke dalam alat pendingin makanan (Walker dkk., 2014).

3.2 Termometer

Termometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur temperatur dari sebuah sistem. Adapun prinsip kerja dari semua termometer pada dasarnya sama, yakni sifat fisika sistem berubah pada saat temperatur sistem berubah (Serway & Jewett, 2008). Sifat ini dikenal sebagai sifat termometrik (Tipler, 1998). Adapun beberapa sifat fisika yang dapat berubah ketika temperatur berubah adalah: (1) volume zat cair; (2) dimensi zat padat; (3) tekanan gas pada volume tetap; (4) volume gas pada tekanan tetap; (5) hambatan listrik pada konduktor; dan (6) warna sebuah benda (Serway & Jewett, 2008). Sebagai contoh, sebagian besar zat yang berfase padatan dan cairan akan mengalami pemuaian apabila dipanaskan. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi perubahan temperatur pada benda (Tipler, 1998).

Termometer yang dibuat pertama kali oleh Galileo menggunakan pemuaian gas. Akan tetapi, termometer yang saat ini banyak digunakan adalah termometer yang terbuat dari tabung kaca yang berongga, dan pada rongga tersebut diisi dengan alkohol yang diberi pewarna merah, ataupun raksa. Selain itu, pada masa kini dikembangkan termometer tanpa sentuhan. Termometer ini banyak digunakan pada masa pandemi Covid-19, sehingga tidak terjadi kontak langsung. Salah satu hasil penelitian menyatakan bahwa termometer yang dibuat dengan menggunakan sensor tubuh GY-906, mikrokontroller *Arduino Uno*, dan LED berukuran

16x2 dapat digunakan untuk mengukur temperatur tubuh manusia pada masa pandemi Covid-19 (Yuniahastuti dkk., 2020). Hasil penelitian yang lain menyatakan bahwa termometer *infrared* yang dikembangkan dapat mengukur temperatur dengan ketepatan pengukuran 98,40%. Cara kerja termometer ini didasarkan pada peginderaan radiasi *infrared* yang dipancarkan oleh sensor MLX90614 (Sari & Rasyid, 2021). Radiasi *infrared* memiliki pancaran yang bervariasi dengan suhu. Termometer *infrared* modern yang ditempatkan di liang telinga lebih akurat dibandingkan dengan termometer alkohol yang diletakkan di bawah lidah maupun ketiak (Lyublinskaya dkk., 2017).

3.3 Skala Temperatur

Seperti telah dijelaskan pada sub bab 3.2 bahwa sebuah benda mengalami perubahan sifat fisika pada saat terjadinya perubahan suhu. Sifat termometrik inilah yang dipergunakan untuk menetapkan skala yang terdapat pada termometer. Misalnya pada termometer yang terbuat dari kaca berongga yang berisi cairan. Pada saat mengalami kenaikan temperatur, cairan yang terdapat tabung kaca akan memuai melebihi kaca. Hal ini menyebabkan tinggi cairan tersebut mengalami peningkatan di dalam tabung (Giancoli, 2014; Tipler, 1998).

Adapun cara menetapkan atau mengkalibrasi skala pada termometer kaca yang menggunakan isian air raksa adalah sebagai berikut (Giancoli, 2014; Serway & Jewett, 2008; Tipler, 1998):

1. Langkah pertama adalah memasukkan termometer ke dalam wadah yang berisi air dan es yang berada pada kesetimbangan, dengan tekanan $1 \times 10^5 \frac{N}{m^2}$.

2. Ketinggian air raksa di dalam tabung kaca akan berkurang apabila pada saat dimasukkan ke dalam wadah tersebut termometer lebih panas dibandingkan dengan air es. Ketinggian air raksa di dalam tabung yang tadinya berkurang akan berhenti berubah pada saat air es telah mencapai kesetimbangan dengan termometer. Posisi baru ketinggian air ini ditandai sebagai **titik beku air**.
3. Langkah selanjutnya adalah termometer tersebut dimasukkan ke dalam wadah yang berisi air yang mendidih pada tekanan $1 \times 10^5 \frac{N}{m^2}$. Ketinggian air raksa di dalam tabung kaca akan meningkat, dan akan berhenti berubah apabila air mendidih tersebut telah mengalami kesetimbangan dengan termometer. Posisi baru ketinggian air pada tabung ditandai sebagai **titik didih air**.

Terdapat beberapa skala temperatur yang paling sering digunakan, diantaranya skala Celsius (*centigrade* yang berarti seratus langkah), skala Farenheit, dan skala mutlak (Kelvin). Skala yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari di Amerika Serikat adalah Farenheit. Pada saat melaporkan hasil pengukuran temperatur dengan menggunakan skala Celsius maupun Farenheit perlu menggunakan tanda derajat ($^{\circ}$). Misalnya 0°C atau 32°F . Akan tetapi, pada saat melaporkan hasil pengukuran temperatur dengan menggunakan skala Kelvin, tidak perlu menggunakan tanda derajat, misalnya $-272,16\text{ K}$ (Giancoli, 2014; Walker dkk., 2014). Berikut ini adalah titik beku air dan titik didih air pada masing-masing skala tersebut.

Tabel 3.1 Titik beku dan titik didih air pada beberapa skala temperatur (Giancoli, 2014; Walker dkk., 2014)

Skala Temperatur	Titik Beku Air	Titik Didih Air
Celsius	0°C	100°C
Fahrenheit	32°F	212°F
Kelvin	273,15 <i>K</i>	373,15 <i>K</i>

Pada skala temperatur Celsius, posisi cairan pada tabung termometer untuk titik beku air ditandai sebagai 0°C. Selanjutnya untuk posisi cairan untuk titik didih air ditandai sebagai 100°C. Selanjutnya, jarak antara 0°C dan 100°C pada termometer dibagi menjadi seratus garis. Berbeda halnya dengan skala temperatur Fahrenheit. Posisi cairan pada tabung termometer untuk titik beku ditandai sebagai 32°F, sedangkan posisi cairan pada titik didih ditandai sebagai 212°F. Jarak antara 32°F dan 212°F pada termometer dibagi menjadi 180 garis. Skala pada masing-masing termometer tersebut dapat diperluas dengan menggunakan jarak yang sama untuk temperatur di atas titik didih maupun di bawah titik beku. Akan tetapi, hal tersebut pun terbatas, karena termometer memiliki keterbatasan. Termometer menjadi tidak dapat digunakan ketika air raksa yang terdapat di dalam tabung kaca mengalami pembekuan di beberapa titik. Pada saat berada pada temperatur di mana cairan air raksa mengalami penguapan pun, termometer tidak dapat digunakan. Oleh karena itu, diperlukan termometer dengan spesifikasi tertentu untuk digunakan dalam pengukuran temperatur yang sangat tinggi maupun sangat rendah (Giancoli, 2014; Tipler, 1998).

3.4 Hubungan Antar Skala Temperatur

Masing-masing skala temperatur memiliki hubungan satu dengan yang lainnya. Dengan demikian, hasil pengukuran dengan yang dilaporkan dengan menggunakan skala Celsius dapat dikonversikan ke skala Farenheit, maupun Kelvin. Begitu juga hasil pengukuran temperatur dalam skala Farenheit dapat dikonversikan ke skala Celsius dan Kelvin.

Tabel berikut berisi beberapa persamaan yang dapat digunakan untuk mengkonversikan hasil pengukuran temperatur dari satu skala ke skala yang lain.

Tabel 3.2 Beberapa persamaan untuk mengkonversikan skala temperatur

Dikonver sikan dari	Dikonversikan ke		
	Celsius	Farenheit	Kelvin
Celsius	-	$\frac{9}{5}T(^{\circ}\text{C}) + 32$	$T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$
Farenheit	$\frac{5}{9}(T(^{\circ}\text{F}) - 32)$	-	$\frac{5}{9}(T(^{\circ}\text{F}) - 32) + 273,15$
Kelvin	$T(K) - 273,15$	$\frac{9}{5}(T(K) - 273,15) + 32$	-

Sebagai contoh, misalnya hasil pengukuran temperatur tubuh seseorang dengan menggunakan skala Celsius adalah 36°C . Apabila hasil pengukuran ini dikonversikan ke dalam skala Farenheit, akan diperoleh:

$$\begin{aligned} 36^{\circ}\text{C} &= \frac{9}{5}(36 + 32) \\ &= \frac{9}{5}(68) \\ &= 122,4^{\circ}\text{F} \end{aligned}$$

Selanjutnya, apabila 36°C dikonversikan ke dalam skala Kelvin akan diperoleh:

$$\begin{aligned} 36^{\circ}\text{C} &= 36 + 273,15 \\ &= 309,15 \text{ K} \end{aligned}$$

3.5 Keseimbangan Termal dan Hukum Termodinamika ke Nol

Konsep temperatur sering diasosiasikan dengan dengan bagaimana panas dan dinginnya sebuah benda yang dirasakan pada saat benda tersebut disentuh. Kita pun seringkali menggunakan indera untuk memperoleh informasi terkait temperatur benda secara kualitatif. Manusia menggunakan indera peraba untuk mengetahui apakah sebuah benda panas atau dingin. Akan tetapi, indera kita tersebut tidak dapat diandalkan untuk melakukan pengukuran temperatur. Pengukuran temperatur dengan menggunakan indera bahkan dapat menyesatkan kita. Sebagai contoh, misalnya di dalam kulkas terdapat sebuah baki yang terbuat dari logam yang digunakan untuk menyimpan es; dan terdapat juga sebuah kotak yang terbuat dari kardus yang digunakan untuk menyimpan sayuran beku. Meskipun keduanya berada pada temperatur yang sama, namun ketika kita mengeluarkan baki logam dan kotak kardus tersebut dari dalam kulkas, indera kita akan merasakan bahwa baki logam akan lebih dingin daripada kotak kardus. Hal ini menunjukkan bahwa indera telah menyesatkan kita dalam mengukur temperatur secara kualitatif. Penyebabnya adalah karena logam mentransfer energi dengan panas pada tingkat yang lebih tinggi dibandingkan dengan kardus (Serway & Jewett, 2008; Tipler, 1998). Oleh karena itu, diperlukan sebuah alat ukur yang dapat mengukur secara kuantitatif, yakni termometer.

Cara kerja termometer didasarkan pada keseimbangan termal. Misalkan terdapat dua buah benda yang memiliki temperatur berbeda. Kedua benda tersebut selanjutnya diletakkan pada sebuah wadah terisolasi. Dalam kondisi tersebut, memungkinkan untuk terjadinya perpindahan energi panas dari benda yang satu ke benda yang lainnya. Pada akhirnya, kedua benda tersebut akan memiliki temperatur yang sama (Giancoli, 2014). Energi panas berpindah dari sebuah benda ke benda yang lainnya karena terdapat perbedaan temperatur (Tipler, 1998). Aplikasi dari konsep ini dalam kehidupan sehari-hari adalah ketika kita mengukur temperatur air yang terdapat dalam gelas dengan menggunakan termometer. Termometer tersebut dimasukkan ke dalam air dan dibiarkan sampai keduanya berada kesetimbangan termal. Kemudian, dilakukan pembacaan terhadap hasil pengukuran dengan menggunakan termometer.

Konsep di atas dikenal sebagai hukum termodinamika ke nol. Adapun bunyi dari hukum termodinamika ke nol adalah: apabila dua buah sistem terdapat pada kesetimbangan termal dengan sistem ketiga, maka mereka berada pada kesetimbangan termal satu dengan yang lain. Para ilmuwan baru menyadari bahwa postulat tersebut seharusnya disebutkan terlebih dahulu sebelum hukum termodinamika pertama maupun kedua. Oleh karena itu, postulat tersebut disebagai hukum termodinamika ke nol (Giancoli, 2014; Tipler, 1998).

DAFTAR PUSTAKA

- Giancoli, D. C. (2014). *Fisika: Prinsip dan Aplikasi, Jilid 1 (Terjemahan Irzam Hardiansyah, S.T)* (7 ed., Vol. 1). Penerbit Erlangga.
- Lyublinskaya, I., Wolfe, G., Ingram, D., Pujji, L., Oberoi, S., & Czuba, N. (2017). *College Physics for AP® Courses*. OpenStax.
<https://openstax.org/details/books/college-physics-ap-courses>
- Sari, W., & Rasyid, R. (2021). Rancang Bangun Sistem Termometer Inframerah dan Hand Sanitizer Otomatis untuk Memutus Rantai Penyebaran Covid-19. *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, 10(1), 76–82.
<https://doi.org/10.25077/jfu.10.1.76-82.2021>
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2008). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* (8 ed.). Thomson Learning, Inc.
- Tipler, P. A. (1998). *Fisika untuk Sains dan Teknik, Jilid 1 (Terjemahan Dra. Lea Prasetio, M.Sc. Dan Rahmad W. Adi, Phd.)* (3 ed.). Erlangga.
- Walker, J., Halliday, D., & Resnick, R. (2014). *Fundamental of Physics* (10 ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Yuniahastuti, I. T., Sunaryantiningsih, I., & Olanda, B. (2020). Contactless Thermometer sebagai Upaya Siaga Covid-19 di Universitas PGRI Madiun. *Jurnal ELECTRA: Electrical Engineering Articles*, 1(1), 28–34.
<https://doi.org/10.25273/electra.v1i1.7597>

BAB 4

SISTEM TERMODINAMIKA

Oleh Eka Sriwahyuni

4.1 Pendahuluan

Ilmu termodinamika sepenuhnya berpusat pada konsep energi. Pada saat yang sama, konsep energi relatif abstrak, dan sulit untuk memberikan definisi yang akurat. Energi hanya dapat diketahui melalui efek yang dihasilkan energi. Ini berarti bahwa energi dapat didefinisikan secara berbeda pada sudut yang berbeda. Energi sendiri selalu ada dan dimanfaatkan oleh manusia dalam kehidupan sehari-hari.

Kehadiran energi di semua bidang kehidupan manusia membuat ilmu termodinamika juga penting untuk penelitian dan pemanfaatan. Ketika manusia mencoba memahami proses pembentukan gas dan uap pada mesin uap, sehingga membuat mereka menjadi tertarik dengan termodinamika. Istilah "kerja mesin" adalah salah satu komponen penting dalam perhitungan termodinamika. Ada dua jenis tinjauan yang harus dilakukan dalam termodinamika untuk mempelajari perilaku dan perubahan struktur fisik. Yang pertama adalah tentang bagaimana suatu sistem seimbang dan mengalami perubahan termodinamika. Yang kedua adalah tentang bagaimana sistem berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya. Termodinamika adalah salah satu cabang ilmu fisika yang mempelajari perubahan dan

aliran energi dalam sistem fisika yang melibatkan panas, suhu, tekanan, dan volume. Fokus dalam termodinamika adalah bagian sistem. Istilah termodinamika berasal dari bahasa Yunani "*thermo*" dan "*dynamis*", yang berarti panas dan gerak (Smith, 1982).

Energi dalam ilmu termodinamika dianggap sebagai suatu bentuk gerakan yang dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Terdapat dua konsep dalam termodinamika: termal atau kalor dan dinamika atau mekanika. Oleh karena itu, termodinamika menyelidiki bagaimana usaha mekanis berinteraksi dengan berbagai bentuk energi, seperti aliran kalor dan perubahan energi dalam suatu sistem. Jenis kalor, koefisien pemuaian, kompresibilitas, dan koefisien dielektrik adalah beberapa sifat bahan yang dapat dipelajari dengan menggunakan azas termodinamika. Selain itu, mekanika statik terkait juga dengan termodinamika. Dalam cabang ilmu fisika ini, pertukaran energi dalam bentuk kerja dan kalor, sistem pembatas, dan lingkungan dibahas. Termodinamika berhubungan erat dengan fisika energi, panas, kerja, entropi dan kespontanan proses.

Sistem termodinamika banyak digunakan dalam berbagai industri, termasuk teknologi pendingin dan mesin pembakaran dalam industri otomotif. Dalam teknologi pendingin, mereka mengeluarkan panas dari ruangan atau ruang. Dalam mesin pembakaran, mereka mengubah energi kimia menjadi energi mekanik yang digunakan untuk menggerakkan mesin. Sistem termodinamika sangat penting dalam kehidupan sehari-hari, terutama dalam industri dan teknologi. Ini karena mereka mempelajari bagaimana energi, panas, dan kerja berinteraksi dengan suatu sistem. Pada dasarnya, semua sistem fisika yang ada mengalami perubahan energi, baik dari segi panas maupun kerja.

Perubahan ini sangat penting dalam proses pengambilan keputusan tentang sistem fisika yang akan ditinjau (Khuriati Ainie, 2007). Termodinamika dapat membantu menelaah dan memahami perubahan, dan dapat digunakan untuk mengukurnya.

4.2 Sistem Termodinamika

Sistem artinya zat makroskopik yang mengalami proses dalam batas-batasnya serta dapat berinteraksi menggunakan lingkungannya dalam bentuk perpindahan massa atau perpindahan energi. Sistem digunakan buat mengidentifikasi subjek dari proses yg dianalisis. Tujuan asal ini adalah buat memisahkan tubuh proses dari lingkungannya. Sistem dipisahkan oleh permukaan atau batas sistem. Batas ini mampu nyata atau imajiner, tidak aktif atau bergerak, sedangkan lingkungan artinya bagian asal sistem eksternal yg mensugesti sistem (Is Fatimah, 2017).

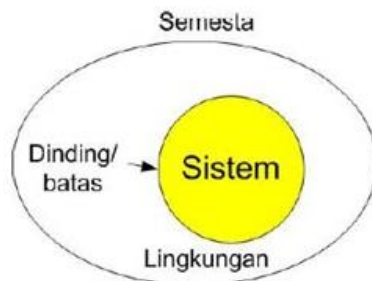
Sistem termodinamika adalah konsep yang digunakan dalam ilmu termodinamika untuk mempelajari perubahan energi dan aliran panas antara suatu objek atau benda dengan lingkungannya. Sistem termodinamika bisa berupa apa pun, mulai dari partikel individu hingga benda yang sangat besar seperti planet atau bahkan alam semesta. Sistem termodinamika biasanya dibatasi oleh suatu batas yang memisahkannya dari lingkungannya. Batas ini bisa berupa dinding nyata atau bisa juga bersifat imajiner. Dinding nyata dapat berupa dinding yang mengizinkan pertukaran energi dalam bentuk panas atau kerja antara sistem dan lingkungan, sedangkan dinding imajiner hanya digunakan sebagai batasan konseptual untuk memahami sistem tersebut.

Sistem termodinamika dapat berinteraksi dengan lingkungan melalui pertukaran energi dalam bentuk panas, kerja, atau bahkan materi. Pertukaran energi dalam bentuk panas terjadi ketika ada perbedaan suhu antara sistem dan lingkungan, sedangkan pertukaran energi dalam bentuk kerja terjadi ketika ada perpindahan energi akibat gaya yang bekerja pada suatu objek (Sukardjo, 1989).

Termodinamika menggambarkan perubahan energi dalam sistem dengan menggunakan hukum-hukum termodinamika, yang melibatkan konsep seperti energi dalam, energi keluar, entropi, dan efisiensi. Hukum-hukum termodinamika menjelaskan batasan-batasan yang ada pada perubahan energi dan aliran panas, serta memberikan petunjuk tentang bagaimana energi dapat dimanfaatkan atau diubah dalam sistem termodinamika. Sistem termodinamika juga sering digambarkan dalam bentuk diagram fase, yang menunjukkan berbagai keadaan fisik dan perubahan yang dapat dialami oleh sistem, seperti perubahan suhu, tekanan, atau volume. Pemahaman tentang sistem termodinamika sangat penting dalam banyak aplikasi, seperti pembangkit listrik, mesin-mesin, sistem pemanas dan pendingin, serta bidang ilmu lainnya yang melibatkan energi dan perubahan panas (Nurhadi Mukhamad, 2021).

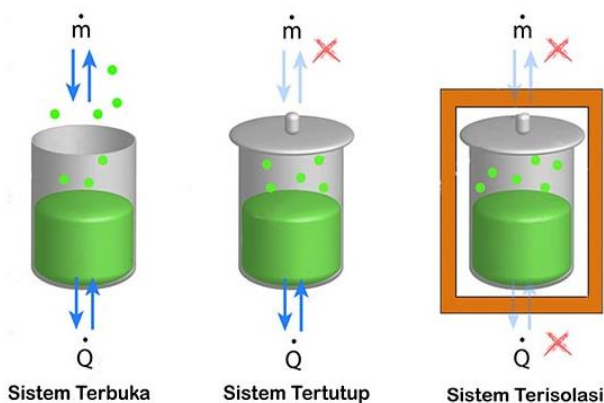
Sistem termodinamika terdiri dari kombinasi sejumlah massa zat tertentu yang membentuk bagian tertentu. Massa zat ini dapat menjadi gas, cair, atau padat secara terpisah. Namun, ia juga dapat berupa campuran dari dua atau tiga zat sekaligus. Jumlah aliran zat tertentu dapat memasuki atau keluar dari sistem. Namun, permukaan batas suatu sistem memungkinkan perpindahan energi terjadi secara bersamaan. Permukaan batas ini memisahkan sistem dengan lingkungan sekitarnya.

Suatu sistem termodinamika adalah suatu masa atau daerah yang dipilih untuk dijadikan obyek analisis. Daerah sekitar sistem tersebut disebut sebagai lingkungan. Batas antara sistem dengan lingkungannya disebut batas sistem (*boundary*), seperti terlihat pada Gambar dibawah ini. Dalam aplikasinya batas sistem merupakan bagian dari sistem maupun lingkungannya, dan dapat tetap atau dapat berubah posisi atau bergerak (Smith, 1982).



Gambar 4.1. Sistem Termodinamika
(Sumber:Khuriati Ainie, 2007)

Dalam termodinamika terdapat dua istilah yaitu sistem dan lingkungan. Sistem adalah benda atau sekumpulan apa saja yang akan diteliti atau diamati, dan lingkungan adalah benda-benda di luar sistem. Semesta atau universal mencakup sistem dan lingkungannya. Batas berfungsi sebagai penghubung antara sistem dan lingkungan. Sebagai ilustrasi, ketika sistem peninjauan melihat gas di dalam bejana, ia menganggap gas tersebut sedangkan bejana itu sendiri adalah lingkungannya. Ada tiga jenis sistem berdasarkan jenis pertukaran yang terjadi antara sistem dan lingkungan, yaitu sistem terisolasi, sistem tertutup dan sistem terbuka yang dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 4.2 Tiga Jenis Sistem Termodinamika
(Sumber: utakatikotak, 2022)

4.2.1 Sistem Terbuka

Sistem termodinamika terbuka melibatkan pertukaran energi dalam bentuk panas dan kerja antara benda dan lingkungannya. Dalam sistem terbuka, ada pembatas yang disebut permeabel yang memungkinkan benda bergerak. Sistem yang mengakibatkan terjadinya pertukaran energi (panas) dan benda (materi) dengan lingkungannya. Sebuah pembatas memperbolehkan pertukaran benda disebut permeabel (Halliday, 1984).

Sistem terbuka merupakan sistem yang memungkinkan terjadinya perpindahan energy (Q) dan zat (materi) antara lingkungan dan sistem. Contohnya: saat merebus air. Contoh sistem terbuka yang umum adalah aliran fluida, seperti air yang mengalir melalui pipa atau aliran udara di sekitar kita. Dalam sistem terbuka ini, fluida (materi) dapat masuk atau keluar dari sistem, serta dapat bertukar energi dengan lingkungan sekitarnya dalam bentuk panas atau kerja (Smith, 1982).

Salah satu konsep penting dalam sistem terbuka adalah massa aliran. Massa aliran mengacu pada jumlah massa yang masuk atau keluar dari sistem dalam periode waktu tertentu. Massa aliran dapat mempengaruhi perubahan sifat-sifat termodinamika sistem terbuka, seperti suhu, tekanan, dan kecepatan aliran.



Gambar 4.3. Sistem Terbuka

Dalam sistem terbuka, pertukaran energi dengan lingkungan dapat terjadi melalui dua mekanisme utama: pertukaran panas dan pertukaran kerja. Pertukaran panas terjadi ketika ada perbedaan suhu antara sistem dan lingkungan, sedangkan pertukaran kerja terjadi ketika ada perpindahan energi akibat gaya yang bekerja pada sistem atau sebaliknya. Pemahaman tentang sistem terbuka sangat penting dalam banyak aplikasi, seperti dalam perancangan mesin, pembangkit listrik tenaga panas, sistem pemanas dan pendingin, serta proses aliran fluida dalam berbagai industri. Termodinamika sistem terbuka memberikan kerangka kerja untuk memahami perubahan energi dan aliran panas yang terjadi dalam sistem yang terbuka untuk pertukaran energi dan materi dengan lingkungan (Nurhadi Mukhamad, 2021).

Bayangkan suatu wadah yang memiliki batas atau dinding yang memisahkan sistem tersebut dari lingkungan sekitarnya. Dinding ini memungkinkan energi dan materi untuk masuk dan keluar dari sistem. Misalnya, kita bisa

membayangkan tangki berisi air yang terhubung dengan pipa. Air dalam tangki adalah sistem terbuka, sedangkan pipa adalah jalur masuk dan keluar energi dan materi.

Dalam sistem terbuka, energi dan materi dapat mengalir melalui batas sistem dan lingkungan. Sebagai contoh, dalam tangki air, air bisa keluar melalui pipa keluar dan air baru dapat masuk melalui pipa masuk. Selain itu, sistem terbuka juga dapat bertukar energi dengan lingkungan melalui pertukaran panas dengan lingkungan sekitarnya, seperti mengalami pemanasan atau pendinginan.

Perhatikan bahwa dalam sistem terbuka, komposisi dan sifat-sifat sistem dapat berubah seiring dengan masuknya atau keluarnya materi dari sistem, serta dengan pertukaran energi dengan lingkungan. Konsep ini sangat penting dalam pemodelan dan analisis termodinamika untuk berbagai sistem, seperti pembangkit listrik tenaga panas, mesin, dan proses aliran fluida.

4.2.2 Sistem Tertutup

Sistem tertutup adalah sistem termodinamika yang di dalamnya terjadi pertukaran energi (panas dan kerja) tetapi tidak terjadi pertukaran benda dengan lingkungan. Rumah hijau adalah contoh dari sistem tertutup di mana terjadi pertukaran panas tetapi tidak terjadi pertukaran kerja dengan lingkungan. Apakah suatu sistem terjadi pertukaran panas, kerja atau keduanya biasanya dipertimbangkan sebagai sifat pembatasnya. Jenis pembatas pada sistem tertutup terbagi menjadi dua yaitu pembatas adiabatik dan pembatas rigid. Perbedaan keduanya terletak pada hal yang dibatasi. Pada pembatas adiabatik, pertukaran panas dibatasi sehingga tidak dapat terjadi sama sekali. Sedangkan pada pembatas rigid yang dibatasi adalah pertukaran kerja. Sistem

termodinamika yang tertutup disebut juga dengan massa atur (Halliday, 1984).

Sistem tertutup adalah jenis sistem termodinamika di mana tidak ada pertukaran materi antara sistem dan lingkungan, tetapi masih memungkinkan pertukaran energi dalam bentuk panas atau kerja. Dalam sistem tertutup, batas sistem mencegah masuk atau keluarnya materi dari sistem, tetapi energi masih bisa berpindah antara sistem dan lingkungan.



Gambar 4.4. Sistem Tertutup

Sebagai contoh, kita dapat membayangkan sebuah bejana tertutup yang di dalamnya terdapat gas tertentu. Gas tersebut terperangkap di dalam bejana, dan tidak ada partikel gas yang masuk atau keluar dari bejana. Namun, energi masih dapat memasuki atau keluar dari sistem dalam bentuk panas atau kerja. Dalam sistem tertutup, perubahan energi dalam sistem dijelaskan oleh hukum pertama termodinamika, yang dikenal sebagai hukum kekekalan energi. Hukum ini menyatakan bahwa energi total dalam sistem tertutup tetap konstan, meskipun dapat berubah bentuk dari satu bentuk ke bentuk lain. Misalnya, energi panas yang masuk ke sistem dapat mengubah energi internal gas, menghasilkan perubahan suhu atau tekanan. Dalam analisis termodinamika sistem tertutup, perhatian utama biasanya adalah pada perubahan energi dalam sistem, seperti energi internal, pekerjaan yang dilakukan atau diterima oleh sistem, dan pertukaran panas dengan lingkungan. Konsep

entropi juga penting dalam sistem tertutup, yang menggambarkan arah perubahan dan tingkat ketidakteraturan sistem (Nurdin Bukit, 2013).

Sistem tertutup sering digunakan dalam banyak aplikasi termodinamika, seperti mesin termal, sistem pemanas dan pendingin, serta siklus termodinamika dalam pembangkit listrik. Memahami sistem tertutup dan prinsip-prinsip termodinamika yang terkait dengannya adalah penting dalam menganalisis dan merancang sistem energi yang efisien (Khuriati Ainie, 2007).

Bayangkan suatu wadah atau bejana yang tertutup rapat, dengan dinding yang tidak memungkinkan masuknya atau keluarnya materi dari sistem. Dalam sistem tertutup, tidak ada pertukaran materi antara sistem dan lingkungan sekitarnya. Namun, pertukaran energi dalam bentuk panas atau kerja masih mungkin terjadi melalui batas sistem. Sebagai contoh, kita dapat membayangkan sebuah silinder berisi gas tertentu yang tertutup oleh penutup yang rapat. Gas tersebut terperangkap di dalam silinder, dan tidak ada partikel gas yang dapat keluar atau masuk dari sistem. Namun, sistem tetap dapat bertukar energi dengan lingkungan sekitarnya melalui perpindahan panas atau kerja. Dalam analisis sistem tertutup, perhatian utama adalah pada perubahan energi dalam sistem. Misalnya, jika panas masuk ke dalam sistem, gas dalam silinder dapat mengalami peningkatan energi internal, menyebabkan peningkatan suhu atau tekanan. Jika ada kerja yang dilakukan pada sistem, energi dapat berpindah ke lingkungan sekitarnya atau sebaliknya.

Penting untuk diingat bahwa dalam sistem tertutup, tidak ada perubahan jumlah atau komposisi materi dalam sistem. Yang berubah adalah energi dalam sistem dan

efeknya terhadap sifat-sifat termodinamika sistem, seperti suhu, tekanan, atau volume.

4.2.2 Sistem Termodinamika Terisolasi

Sistem terisolasi adalah sistem yang sangat tertutup dan terpisah dari lingkungannya. Ini tidak memungkinkan pertukaran materi atau panas dari sistem ke lingkungannya atau sebaliknya atau sistem termodinamika terisolasi adalah jenis sistem termodinamika di mana tidak ada aliran materi atau energi yang masuk atau keluar dari sistem tersebut. Artinya, materi dan energi dalam sistem tidak dapat diubah atau ditukar dengan lingkungannya. Akibatnya, sistem terisolasi adalah yang ideal dan sulit ditemukan dalam kehidupan sehari-hari (Halliday, 1984). Karena tidak ada aliran materi atau energi yang masuk atau keluar dari sistem, maka sifat-sifat sistem termodinamika terisolasi adalah sebagai berikut:

1. Energi dalam sistem selalu konstan.
Dalam sistem terisolasi, energi tidak dapat dimasukkan atau dikeluarkan dari sistem, sehingga energi dalam sistem selalu tetap konstan.
2. Entropi dalam sistem selalu meningkat.
Sesuai dengan Hukum Kedua Termodinamika, entropi atau ketidakteraturan alami selalu meningkat dalam sistem tertutup. Karena sistem terisolasi tidak memiliki interaksi dengan lingkungan di sekitarnya, maka entropi dalam sistem terisolasi selalu meningkat.
3. Suhu dalam sistem dapat berubah.
Meskipun tidak ada aliran panas atau energi yang masuk atau keluar dari sistem, suhu dalam sistem terisolasi dapat berubah karena perubahan energi kinetik atau potensial dalam sistem (Sukardjo, 1989).

Sistem yang terisolasi menghindari pertukaran panas, zat, atau kerja dengan lingkungannya. Air yang disimpan

dalam termos dan tabung gas yang terpisah, misalnya. Dalam kenyataannya, sistem tidak dapat terisolasi sepenuhnya dari lingkungannya karena akan ada pencampuran dan penarikan gravitasi kecil. Energi yang masuk ke sistem dalam analisis sistem terisolasi sama dengan energi yang keluar dari sistem. Namun, dalam kehidupan sehari-hari, sistem termodinamika terisolasi sangat sulit ditemukan.



Gambar 4.5. Sistem Terisolasi

Contoh lain dari sistem termodinamika terisolasi adalah termos yang diisolasi dengan sempurna. Dalam sebuah termos, tidak ada aliran panas atau materi yang masuk atau keluar dari sistem, sehingga dapat dianggap sebagai sistem terisolasi.

Sistem termodinamika terisolasi tidak banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, tetapi mereka digunakan dalam penelitian dan pengembangan teknologi untuk membuat sistem yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Misalnya, konsep sistem terisolasi digunakan dalam pengembangan bahan isolasi termal untuk menjaga suhu dalam bangunan agar tetap stabil dan menghemat energi.

DAFTAR PUSTAKA

- Halliday, D.R.R. (1984) *Fisika Universitas I*. Jakarta: Erlangga.
- Is Fatimah (2017) *Kimia Fisika*. 1st edn. Yogyakarta: Deepublish.
- Khuriati Ainie (2007) *Termodinamika*. 1st edn. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Nurdin Bukit (2013) *Thermodinamika*. 1st edn. Medan: Unimed Press.
- Nurhadi Mukhamad (2021) *Buku Gas dan Termodinamika*. 1st edn. Malang: Media Nusa Creative.
- Smith, E.B. (1982) *Basic Chemical Thermodynamiscs*. New Yourk: Oxfort University Press.
- Sukardjo, D. (1989) *Kimia Fisika*. 1st edn. Jakarta: PT. Bina Aksara.

BAB 5

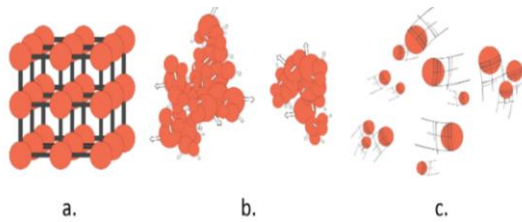
FASE DAN PERUBAHAN FASE (PADAT, CAIR, DAN GAS)

Oleh Desy Nurhasanah Sari

5.1 Fase

Dalam ilmu fisika, fase (*phase*) menggambarkan keadaan suatu zat yang homogen secara kimia dan berbeda secara fisik serta dapat dipisahkan secara mekanis. Dapat dipisahkan secara mekanis berarti fase tersebut dapat dipisahkan dengan cara filtrasi, sedimentasi, dekantasi, dan sebagainya. Dalam hal ini tidak termasuk pemisahan dengan cara penguapan, destilasi, adsorpsi, atau ekstraksi. Pada sistem air terdapat fase padat (es), fase cair (air), dan fase gas (uap air). Zat murni seperti air dapat berada dalam satu fase atau lebih tergantung pada suhu dan tekanannya (Fatimah, 2017; Noer & Dayana, 2021).

Semua zat tersusun atas partikel-partikel kecil yang disebut atom. Molekul dan atom dapat bergabung dengan cara yang berbeda untuk membentuk gas, cairan, dan padatan (Intang & Nursiwan, 2021). Gambar 5.1 menunjukkan kerapatan antar molekul yang membedakan padatan, cairan, dan gas.



Gambar 5.1. Susunan Molekul (a) Padat, (b) Cair, dan (c) Gas (Masruroh dkk., 2021).

1. Padat (Solid)

Fase padat memiliki gaya tarik antarmolekul yang sangat kuat yang jaraknya sangat dekat. Hal ini akan membuat molekul penyusunnya cenderung mempertahankan jarak yang relatif konstan sehingga fase padat teratur dan tidak dapat dimampatkan (*non compressible*) (Masruroh dkk., 2021). Pada fase padat molekul-molekul berdekatan sehingga gaya tarik, gaya gravitasi, dan energi potensial internal suatu zat menjadi lebih kecil. Struktur molekul dalam padatan kaku sehingga membatasi pergerakannya. Kristal adalah padatan yang partikelnya tersusun dalam barisan yang teratur, seperti logam, berlian, es, garam. Padatan yang partikelnya tidak teratur disebut amorf. Padatan amorf biasanya memiliki tekstur mengkilap atau elastis karena kemasannya yang rapat. Lilin, kaca, karet dan plastik adalah contoh padatan amorf (Intang & Nursiwan, 2021).

2. Cair (Liquid)

Fase cair (liquid) memiliki gaya antar mol yang lebih kecil dibandingkan fase padat karena jarak antar molekulnya lebih besar (Hendri, 2021). Gaya antarmolekul pada fase cair yang tidak begitu kuat sehingga dapat bergerak bebas dan mengalir atau berubah bentuk mengikuti wadah/tempatnya. Contoh : air, darah,

air, susu, madu. (Intang & Nursiwan, 2021; Masruroh dkk., 2021).

3. Gas

Fase gas adalah keadaan materi di mana atom atau molekul memiliki energi yang cukup untuk bergerak bebas. Gas selalu mengisi setiap ruang yang ditempatinya, berbeda dengan cairan atau padatan karena dapat dengan mudah dimampatkan (Suardana, 2017). Saat suhu meningkat, molekul-molekul pada fase gas terdistribusi secara berjauhan dan memiliki susunan acak, sehingga molekul-molekul tersebut akan bergerak secara acak tetapi berkesinambungan (Nurhadi, 2021).

Gas akan mempertahankan ukurannya tetapi tidak pada bentuknya karena memiliki kekuatan yang cukup untuk mengatasi gaya yang dapat mengekangnya. Gas dapat bergerak dengan kecepatan tinggi dan bertabrakan dengan dinding wadah dan komponen lainnya. Gas mudah dikompresi, tetapi jika wadahnya kurang bagus maka akan mudah bocor. Gas dalam kehidupan sehari-hari, misalnya kita dapat mencium bau parfum yang digunakan oleh orang lain karena gas parfum bergerak mendekati kita (Hendri, 2021; Intang & Nursiwan, 2021).

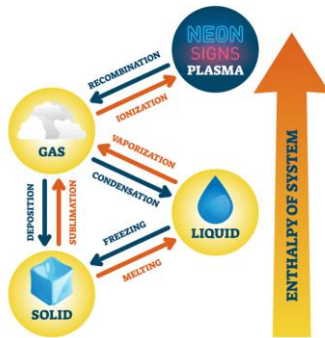
Gaya tarik-menarik antar partikel gas sangat kecil dan tidak signifikan karena jarak antar partikel jauh lebih besar daripada ukurannya. Kecepatan partikel berubah karena tumbukan antara partikel dan dinding wadah. Pada suhu tertentu, kecepatan rata-rata partikel gas tetap, meskipun kecepatan berubah karena tumbukan dengan partikel lain dan dinding wadah. Contoh : oksigen, karbon dioksida, hidrogen, ozon, helium, xenon, radon, dan nitrogen (Suardana, 2017).

4. Plasma

Plasma memiliki sifat berbeda dari padatan, cairan, gas, dan dianggap sebagai materi baru. Plasma mirip dengan gas, tetapi memiliki jumlah partikel bermuatan yang cukup yang membuatnya menjadi konduktor listrik dan bereaksi kuat terhadap medan elektromagnetik. Plasma dapat ditemukan secara alami di alam semesta dan merupakan bentuk materi yang paling melimpah di tata surya karena matahari terbuat dari plasma. Beberapa contoh plasma seperti petir, lapisan ionosfer bumi, ekor komet, dan bintang. Plasma dapat dibuat secara artifisial, seperti pada lampu neon, layar plasma, dan fusi nuklir.

5.2 Perubahan Wujud Zat

Suhu, tekanan, atau zat lain yang bereaksi dengan suatu zat dapat mengubah wujudnya. Misalnya, ketika es diletakkan pada suhu ruangan maka dapat meleleh menjadi air, dan ketika air dipanaskan maka dapat menguap menjadi uap air. Pada kedua kasus tersebut tidak ada perubahan kimia pada zat tersebut, hanya perubahan fisik. Oleh karena itu, perubahan wujud zat adalah salah satu contoh perubahan fisika yang terjadi pada suatu zat. Perubahan wujud tidak menghasilkan zat baru, hanya mengubah bentuk atau wujudnya (Suardana, 2017). Gambar 5.2 menunjukkan perubahan wujud zat.



Gambar 5.2 . Perubahan Wujud Zat (Oxtoby et al., 2001)

Gas, cair, dan padat dikenal sebagai tiga wujud materi, tetapi masing-masing wujud padat dan cair ada dalam satu atau lebih bentuk. Oleh karena itu, diperlukan istilah lain untuk menggambarkan berbagai bentuk, dan istilah fase digunakan. Setiap bentuk yang berbeda disebut fase, namun konsep fase yang didefinisikan sebagai bagian homogen dari suatu sistem meluas melampaui satu bahan, karena fase juga dapat melibatkan beberapa bahan. Sebagai contoh, larutan homogen dari sejumlah zat adalah sistem satu fase. Istilah fase digunakan untuk menjelaskan banyak perubahan (reaksi) fisika dan kimia (Oxtoby et al., 2001).

1. Mencair (*melting*)

Mencair adalah perubahan wujud yang terjadi karena molekul bergerak cepat dan menyerap kalor. Pemanasan atau peningkatan suhu suatu benda dapat menyebabkannya berubah menjadi cair. Salah satu contoh yang mengalami perubahan wujud saat mencair adalah es batu (Oxtoby et al., 2001).

2. Menguap (*evaporation*)

Penguapan adalah perubahan wujud cair menjadi gas atau uap pada suhu dan tekanan di bawah titik didih. Saat air mendidih, molekul air mulai bergerak sangat cepat dan melepaskan diri dari ikatannya dan berubah menjadi uap. Energi panas melemahkan ikatan antara molekul air, memungkinkan bergerak lebih cepat dan bertabrakan satu sama lain, menciptakan gelembung uap. Titik didih normal cairan adalah suhu di bawah 100°C jika tekanan atmosfer lebih rendah dari 1 atm (Oxtoby et al., 2001).

3. Menyublim (*sublimation*)

Menyublim (sublimasi) adalah transformasi zat dari padat menjadi gas tanpa melalui fase cair, hal ini terjadi karena benda padat memiliki tekanan udara yang rendah. Contoh peristiwa menyublim dalam kehidupan sehari-hari yaitu kapur barus yang disimpan di lemari lama kelamaan akan habis dan uap pewangi mobil yang padat lama kelamaan pewanginya habis (Oxtoby et al., 2001).

4. Membeku (*freezing*)

Membeku adalah suatu proses perubahan suatu benda dari cair menjadi padat, proses ini terjadi karena penurunan suhu atau pendinginan. Pada proses ini molekul bergerak lambat dan melepaskan kalor. Air yang dibekukan dalam lemari es (*freezer*) menjadi es batu adalah contoh proses pembekuan dalam kehidupan sehari-hari (Oxtoby et al., 2001).

5. Mengembun (*condensation*)

Mengembun (kondensasi) adalah peristiwa perubahan wujud dari gas menjadi cair. Peristiwa pengembunan terjadi ketika uap air di udara melewati

permukaan yang jauh lebih dingin daripada titik embun uap air. Temperatur sangat penting untuk proses kondensasi, karena pada malam hari temperatur udara turun di bawah titik embun sehingga udara tidak dapat mengikat uap dan berubah menjadi embun. Perbedaan suhu, penyerapan panas, dan tekanan memengaruhi proses pengembunan yang melibatkan molekul yang bergerak lambat dan melepaskan kalor. Selama proses ini, zat memerlukan energi bebas. Beberapa contoh pengembunan atau kondensasi adalah cermin mengembun, napas yang berkabut, dan kondensasi pada kaca atau botol minuman dingin (Oxtoby et al., 2001).

6. Mengkristal (*deposition*)

Mengkristal adalah proses perubahan gas menjadi padat. Salah satu contoh proses mengkristal yaitu uap berubah menjadi salju karena gas berubah menjadi padat dan molekul bergerak lambat dan melepaskan kalor (Oxtoby et al., 2001).

7. Ionisasi (*ionization*)

Ionisasi merupakan perubahan fase gas menjadi plasma atau partikel terionisasi. Proses ionisasi adalah proses di mana atom atau molekul memperoleh muatan negatif atau positif dengan mendapatkan atau kehilangan elektron. Tidak seperti padatan, cairan, atau gas, plasma adalah campuran partikel bermuatan positif dan negatif yang tidak memiliki bentuk atau volume yang tetap. Dalam spektrometri massa dan terapi radiasi, ionisasi gas sangat digunakan. Lampu neon adalah contoh ionisasi gas yang kita lihat setiap hari (Oxtoby et al., 2001).

8. Rekombinasi (*Recombination*)

Rekombinasi terjadi ketika plasma berubah menjadi gas, elektron terikat oleh ion dan kemudian terikat menjadi molekul membentuk gas. Salah satu contoh proses rekombinasi dalam kehidupan sehari-hari yaitu terjadinya kilat/petir (Oxtoby et al., 2001).

5.3 Perubahan Fase

Perubahan fase dan perubahan wujud zat adalah dua konsep yang berbeda. Suatu zat dapat berubah dari satu fase ke fase lain sebagai hasil dari perubahan suhu atau tekanan, misalnya perubahan dari padat ke cair atau dari cair ke gas. Perubahan fase suatu zat terjadi pada saat atom/senyawa suatu zat mencapai titik tertentu, biasanya diukur dengan angka suhu. Air dapat berubah dari padat menjadi cair ketika suhunya mencapai titik lelehnya dan dari cair menjadi gas ketika suhunya mencapai titik didihnya. Tabel 5.1 menunjukkan perbedaan umum antara perubahan fase dan perubahan wujud zat (Masruroh, Nuriyah, & Istiriyah, 2021).

Tabel 5.1 Perbedaan antara Perubahan Fase dan Perubahan Wujud Zat (Masruroh, Nuriyah, & Istiriyah, 2021).

No	Proses	Perubahan Fase	Perubahan Wujud Zat
1	Padat ke Cair	Es batu yang meleleh menjadi air ketika suhu mencapai titik leleh.	Es batu yang meleleh menjadi air saat suhunya meningkat
2	Cair ke Gas	Air yang menguap menjadi uap air ketika suhunya mencapai titik didih	Air yang menguap menjadi uap saat dipanaskan

No	Proses	Perubahan Fase	Perubahan Wujud Zat
3	Cair ke Cair	Uap air yang mengembun menjadi air ketika suhunya menurun	Air yang mengalami perubahan dari air tawar menjadi air garam melalui proses penguapan dan pengendapan
4	Gas ke Padat	Gas belerang yang mengkristal menjadi padatan belerang ketika suhunya menurun.	Uap air yang mengembun menjadi butiran air atau embun saat suhunya menurun.

Perubahan fase adalah ketika suatu zat berubah dari bentuk padat, cair, atau gas ke bentuk yang berbeda. Setiap elemen dan zat dapat bertransisi dari satu fase ke fase lainnya pada kombinasi suhu dan tekanan tertentu (Dewi, 2022).

1. Suhu

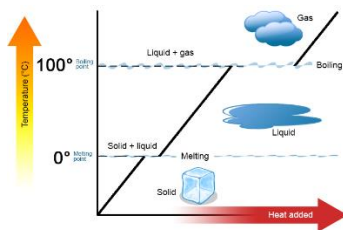
Suhu dapat mengubah fase suatu zat. Salah satu contoh yang umum adalah memasukkan air ke dalam freezer untuk mengubahnya menjadi es. Ketika kita memiliki zat padat (es) di dalam sebuah wadah kemudian kita meletakkannya di atas sumber panas seperti kompor, panas ditransfer ke zat tersebut sehingga meningkatkan energi kinetik molekul-molekul di dalam zat tersebut. Suhu meningkat hingga zat tersebut mencapai titik lelehnya. Semakin banyak panas yang ditransfer melampaui titik leleh, zat tersebut mulai meleleh dan menjadi cairan. Jenis perubahan fase ini disebut proses

isobarik karena tekanan sistem tetap pada tingkat yang konstan (Masruroh, Nuriyah, & Istiriyah, 2021)

2. Tekanan

Tekanan juga dapat digunakan untuk mengubah fase zat. Ketika kita memiliki wadah yang dilengkapi dengan piston yang menyegel gas. Saat piston menekan gas, tekanan meningkat. Setelah titik didih tercapai, gas akan mengembun menjadi cairan. Saat piston terus memampatkan cairan, tekanan akan meningkat hingga titik leleh tercapai. Cairan kemudian akan membeku menjadi padat. Contoh ini adalah untuk proses isothermal di mana suhunya konstan dan hanya tekanan yang berubah (Masruroh, Nuriyah, & Istiriyah, 2021).

Pemanasan dan pendinginan dapat mengubah fase. Ketika padatan dipanaskan, suhunya naik hingga padatan tersebut mulai mencair. Suhu cairan tidak akan naik sampai semua padatan meleleh, jika pemanasan berlanjut maka suhu cairan akan naik hingga titik cairan itu mulai mendidih. Titik lebur atau titik leleh adalah suhu pada saat zat padat mencair, sedangkan suhu saat cairan mendidih disebut titik leleh. Saat uap didinginkan, terjadi sebaliknya yaitu uap akan mengembun pada suhu tertentu dan akan membeku pada suhu yang lebih rendah. Titik beku dan titik lelehnya sama, sementara titik embun dan didih sama (Hendri, 2021). Kurva perubahan fase suatu zat selama pemanasan ditunjukkan pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Kurva Perubahan Fase Air (Hendri, 2021).

Air yang dipanaskan akan berubah menjadi uap dan es yang dipanaskan akan mencair. Energi panas dan energi kinetik partikel es meningkat saat es memanaskan menyebabkan suhu meningkat. Sebagai contoh, suhu es batu sebelum dipanaskan adalah -3°C , tetapi saat dipanaskan suhunya menjadi -2°C , -1°C , dan kembali ke 0°C . Pada suhu 0°C , partikel es memiliki energi kinetik yang cukup untuk menghentikan kenaikan suhu karena partikel padatan menggunakan energi panas untuk mengatasi gaya tarik-menarik. Setelah es mencair dan pemanasan berlanjut, suhu mulai meningkat dari 1°C , 2°C , 3°C hingga mencapai 100°C . Pada titik ini, suhu berhenti naik karena partikel air telah memperoleh energi kinetik yang cukup, dan partikel air menggunakan suhu ini untuk mengatasi gaya tarik menarik. Energi yang dibutuhkan per satu mol air untuk mengubah fase yaitu $\Delta H_{\text{uap}} = 40,7 \text{ kJ/mol}$ dan $\Delta H_{\text{fus}} = 6.01 \text{ kJ/mol}$. Energi ini khusus untuk air karena setiap senyawa memiliki energi kisi yang berbeda pada fase padat, dan membuat perbedaan kekuatan kontak antarmolekul pada fase cair (Hendri, 2021).

Panas yang digunakan oleh partikel es dan air untuk mengatasi gaya tarik-menarik disebut kalor laten atau panas tersembunyi. Kalor laten yang digunakan oleh es untuk mengubah menjadi keadaan cair disebut kalor laten fusi, dan

kalor laten yang digunakan oleh air untuk mengubah menjadi gas disebut kalor laten penguapan (Oxtoby et al., 2001).

Setiap perubahan fasa suatu zat ditandai dengan panas yang dibutuhkan untuk menyelesaikan perubahan fase per gram (atau per mol) bahan. Kalor fusi (ΔH_{fus}) adalah jumlah kalor per gram (atau per mol) yang diperlukan untuk perubahan fase pada titik leleh, dan kalor penguapan (ΔH_{vap}) adalah jumlah kalor per gram (atau per mol) yang diperlukan untuk perubahan fase yang pada titik didih. Untuk mengetahui jumlah total gram atau mol bahan dapat menggunakan ΔH_{fus} atau ΔH_{vap} untuk menentukan total panas yang ditransfer untuk peleburan atau pepadatan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\text{Energi panas} = \eta \times \Delta H_{fus} \quad (1)$$

Di mana η adalah jumlah mol dan ΔH_{fus} dinyatakan dalam energi/mol

$$\text{Energi panas} = m \times \Delta H_{fus} \quad (2)$$

Di mana m adalah massa dalam gram dan ΔH_{fus} dinyatakan dalam energi/gram.

Untuk pendidihan atau pengembunan, digunakan persamaan :

$$\text{Energi panas} = \eta \times \Delta H_{vap} \quad (3)$$

Di mana η adalah jumlah mol dan ΔH_{vap} dinyatakan dalam energi/mol.

$$\text{Energi panas} = m \times \Delta H_{vap} \quad (4)$$

Di mana m adalah massa dalam gram dan ΔH_{vap} dinyatakan dalam energi/gram.

Contoh :

Berapa banyak panas yang diperlukan untuk melelehkan 55,8 gram es (H_2O padat) pada suhu $0^\circ C$? Kalor fusi H_2O adalah 79,9 kal/gram

Jawab

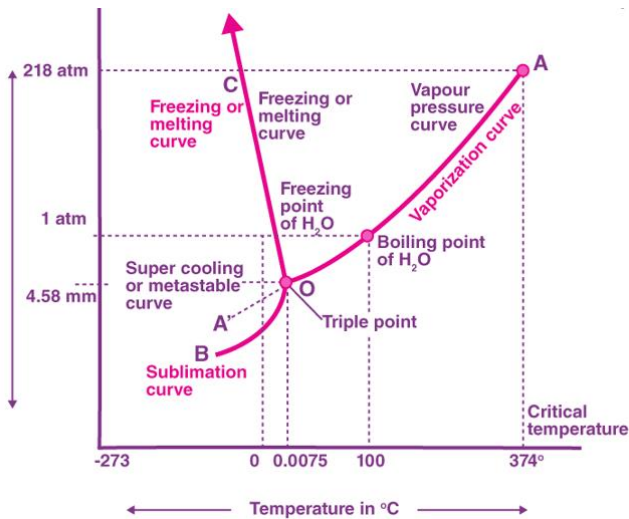
Kita dapat menggunakan hubungan antara kalor dan kalor fusi (Persamaan 1) untuk menentukan berapa kalor yang dibutuhkan untuk mencairkan es.

$$\text{Energi panas} = \eta \times \Delta H_{fus}$$

$$\begin{aligned}\text{Energi panas} &= (55,8 \text{ gram}) \left(\frac{79,9 \text{ kal}}{\text{gram}} \right) \\ &= 4,460 \text{ kal.}\end{aligned}$$

5.4 Diagram Fase

Diagram fase adalah representasi grafis dari berbagai fase zat atau campuran zat yang hidup berdampingan dalam kesetimbangan termodinamika dan mengalami perubahan fase dalam kondisi kerja yang berbeda seperti suhu, tekanan, atau volume. Dalam kimia fisik, diagram fase atau dikenal sebagai diagram P-T digunakan untuk menunjukkan kondisi keadaan kesetimbangan antara berbagai fase dari zat yang sama. Gambar 5.3 menunjukkan diagram fase dengan sumbu x dan y yang menunjukkan tekanan dan suhu. Sebagai contoh, H₂O dapat berbentuk fase padat, cair, atau gas dalam kondisi tertentu (Dewi, 2022).



Gambar 5.3 Diagram fase (Oxtoby et al., 2001).

Setiap garis menunjukkan kondisi yang ada ketika dua fase hidup berdampingan, tetapi perubahan suhu atau tekanan dapat menyebabkan fase berubah secara tiba-tiba dari satu fase ke fase yang lain. Pada area AOC, AOB, dan BOC menunjukkan kondisi pada suhu dan tekanan di mana satu fase, yaitu es, air, dan uap air dapat tertahan tanpa batas. BOC-Es menunjukkan fase padat, COA-Air menunjukkan fase cair, dan AOB-Uap menunjukkan fase gas (Oxtoby et al., 2001).

1. Garis O-B menggambarkan garis sublimasi air yang merupakan perubahan dari wujud padat ke gas. Kurva O-B berakhir pada B, yang merupakan suhu nol absolut -273 °C. kurva ini menggambarkan tekanan uap es padat pada suhu yang berbeda-beda. Dalam kesetimbangan, dua fase es padat dan uap air berdampingan (Oxtoby et al., 2001). Pada tekanan yang cukup rendah tidak ada fase cair, tetapi substansi dapat berbentuk gas atau padat. Untuk air, tidak ada fase cair pada tekanan di bawah 0,0075 atm. Perubahan fase dari padat ke gas disebut sublimasi. Hal ini

menyebabkan hilangnya tumpukan salju yang tidak pernah sampai ke sungai, pencairan otomatis rutin pada lemari es, dan proses pengeringan beku yang diterapkan pada banyak makanan. Karbon dioksida di sisi lain menyublim pada tekanan atmosfer standar 1 atm. Bentuk padat CO_2 dikenal sebagai es kering karena tidak mencair. Sebaliknya, bergerak langsung dari bentuk padat ke bentuk gas (Oxtoby et al., 2001).

2. Garis O-A mewakili garis didih air yang merupakan transisi dari fase cair ke fase gas. Pada tekanan 4,58 mmHg, air mendidih pada suhu 0,0075 °C. Tekanan kritis untuk kurva ini adalah 218 atm dan suhunya 374 °C. Dua fase air dan uap air berada dalam kesetimbangan di sepanjang kurva. Air akan mendidih pada suhu 100°C dengan tekanan 1 atm (760 mmHg). Sebuah panci presto (atau bahkan panci yang tertutup) akan memasak makanan lebih cepat karena air dapat bertahan dalam bentuk cairan pada suhu lebih dari 100°C tanpa harus mendidih. Kurva ini berakhir pada titik yang disebut titik kritis, karena pada suhu yang lebih tinggi, fase cair tidak ada pada tekanan apa pun (Oxtoby et al., 2001).
3. Garis beku air (O-C) menunjukkan transisi dari fase cair ke padat. Pada tekanan 1 atm (760 mmHg) air membeku pada suhu 0°C, dan pada tekanan 5,58 mmHg air membeku pada suhu 0.0075 °C. Pada kesetimbangan, dua fase es padat dan cair berdampingan. Kurva ini menunjukkan bahwa titik leleh es menurun seiring dengan meningkatnya tekanan. Pada 1 atm, garis memotong kurva pada 0°C (Oxtoby et al., 2001).
4. Titik "O" disebut sebagai titik tripel karena kurva AO, OB, dan OC bertemu. Pada titik tripel, fase gas, cair, dan padat seimbang pada suhu dan tekanan tertentu. Titik tripel terjadi pada suhu 0.0075°C dan tekanan 4.58 mm Hg. Pada titik kritis dalam sebuah diagram fase, suatu zat akan memiliki sifat-sifat khusus. Dalam kondisi titik kritis, suatu zat tidak dapat dibedakan antara fase uap dan cair, dan

memiliki sifat-sifat yang unik. Misalnya, fluida superkritikal memiliki kepadatan yang lebih tinggi daripada gas, namun lebih rendah daripada cairan. Hal ini membuat fluida superkritikal memiliki sifat-sifat yang menarik dalam aplikasi industri, seperti dalam proses ekstraksi, pemurnian, dan pengolahan bahan kimia. (Oxtoby et al., 2001).

Terdapat dua poin penting yang perlu diperhatikan dalam proses perubahan fase. Pertama, pada titik leleh atau titik didih suatu zat dapat terjadi dua fase secara bersamaan. Air (H_2O) memiliki titik leleh 0°C dan titik didih 100°C . Pada suhu 0°C , air berada pada fase padat (es) dan cair. Jika panas diberikan, sebagian es akan meleleh dan berubah menjadi H_2O cair. Jika panas dihilangkan terjadi sebaliknya, sebagian H_2O cair berubah menjadi H_2O padat. Proses serupa dapat terjadi pada suhu 100°C yaitu jika di berikan panas maka akan meningkatkan jumlah gas H_2O , sedangkan menghilangkan panas akan meningkatkan jumlah H_2O cair (Hendri, 2021). Pada suhu dan tekanan yang sangat tinggi, fase cair dan gas tidak dapat dibedakan. Titik kritis air terjadi sekitar $T_c = 647,096 \text{ K}$ ($1,164.773^\circ\text{R}$), $p_c = 22,064 \text{ MPa}$ ($3,200.1 \text{ psi}$) dan $p_c = 356 \text{ kh/m}^3$.

Perbedaan yang signifikan antara diagram fase umum dan diagram fase air. Kemiringan garis yang menghubungkan keadaan padat dan cair dalam diagram air adalah negatif, bukan positif. Air adalah zat yang tidak biasa karena wujud padatnya kurang padat daripada wujud cairnya. Es akan mengapung di dalam air, akibatnya perubahan tekanan memiliki efek yang berlawanan pada kedua fase tersebut. Ketika es berada di dekat titik lelehnya, es dapat diubah menjadi air cair dengan memberikan tekanan. Dalam fase cair, molekul air sebenarnya lebih dekat satu sama lain daripada fase padat. Semua cairan memiliki tekanan uap

jenuh tertentu pada suhu tertentu. Dalam keadaan terbuka, zat cair akan mendidih jika tekanan uap jenuhnya sama dengan tekanan atmosfer (Oxtoby et al., 2001)

Latihan

1. Mengapa titik leleh es menjadi lebih rendah pada tekanan yang lebih tinggi?
2. Apakah mungkin memampatkan uap untuk membentuk cairan jika suhunya lebih tinggi dari 374°C ?
3. Sebanyak 6 mol aseton dan 4 mol kloroform dicampur pada suhu 35°C . Tekanan uap jenuh aseton pada suhu tersebut 360 torr dan tekanan uap jenuh kloroform pada suhu tersebut 250 torr. Hitunglah tekanan uap larutan tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Dewi, R.P. (2022) *Termodinamika*. Magelang: Pustaka Rumah Cinta.
- Fatimah, I. (2017) *Kimia Fisika*. 2017th edn. Yogyakarta: Deepublish.
- Hendri (2021) *Teknik Pendinginan Dasar*. Padang: UNP Press.
- Intang, A. and Nursiwan (2021) *Aplikasi Termodinamika :Analisa Eksergi Siklus Kompresi Uap Sistem Pompa Panas pada AC $\frac{3}{4}$ Pk*. Bandung: Media Sains Indonesia.
- Masruroh, Nuriyah, L. and Istiroyah (2021) *Termodinamika Tinjauan Sains dan Rekayasa*. Malang: Universitas Brawijaya Press.
- Noer, Z. and Dayana, Indsri (2021) *Material Sains*. Magelang: Guapedia.
- Nurhadi, M. (2021) *Gas dan Termodinamika*. Malang: Media Nusa Creative.
- Oxtoby, D.W., Gillis, H.P. and Nachtrieb, N.H. (2001) *Prinsip-Prinsip Kimia Modern*. 4th edn. Jakarta: Erlangga.
- Suardana, N. (2017) *Kimia Fisika I*. Depok: PT Rajawali Pers.

BAB 6

KALOR

Oleh Azmalaeni Rifkah Ansyarif

6.1 Kalor sebagai Transfer Energi

Kata kalor telah sering digunakan namun banyak orang belum memahami maksud dari istilah tersebut karena seringkali digunakan secara tidak konsisten. Oleh karena itu, penting untuk mendefinisikan kata tersebut dengan jelas dan mengaitkannya dengan konsep dan fenomena yang berkaitan dengannya (Giancoli, 1999).

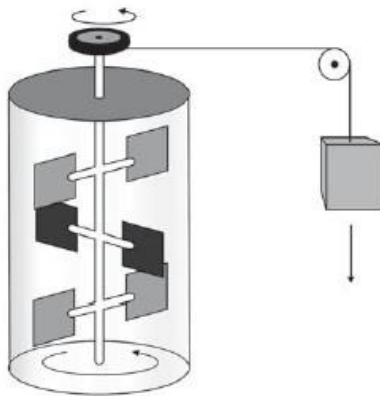
Kalor biasanya ditransfer dari kompor ke panci, dari matahari ke bumi, atau dari mulut seseorang ke termometer demam. Pergerakan benda cair yang disebut kalorik juga disebut sebagai kalori. Namun, cairan kalorik tidak pernah dapat terdeteksi. Abad sembilan belas, ditemukan bahwa kalor dapat digambarkan menggunakan model yang baru yang memandang kalor sebagai sesuatu seperti usaha. Kalorik adalah sumber kalor yang masih digunakan. Jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 gram air menjadi 1 derajat Celcius disebut kalori (kal). Kilokalori (kkal), yang setara dengan 1000 kalori, adalah satuan kalori yang paling sering digunakan untuk menentukan nilai energi makanan. 1 kkal adalah kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 kilogram air sebesar 1 C°. Pada satuan Inggris, kalor diukur dalam British thermal unit (Btu). Satu Btu didefinisikan sebagai kalor yang dibutuhkan untuk

menaikkan temperatur 1 lb air sebesar 1 °F. 1 Btu = 0,252 kkal = 1056 J (Giancoli, 1999).

Pada tahun 1800-an, sejumlah ilmuwan, terutama penyuling Inggris James Prescott Joule (1818–1889), melakukan eksperimen untuk menetapkan pemahaman kita tentang kalor, seperti usaha, yang merupakan perpindahan energi. Gambar 6.1 menunjukkan eksperimen sederhana yang dilakukan Joule. Baling-baling berputar karena berat yang bergerak turun. Temperatur air sedikit meningkat karena gesekan antara baling dan air. Ini sangat sulit untuk diukur, menurut Joule. Joule menemukan dalam percobaan lain bahwa usaha sebesar 4,186 Joule (J) secara kuantitatif sama dengan 1 kalori (kal) kalor. Itu disebut ekuivalensi mekanikal kalor:

$$4,186 \text{ J} = 1 \text{ kal};$$

$$4,186 \text{ kJ} = 1 \text{ kkal}.$$



Gambar 6.1 Eksperimen Joule tentang Ekuivalensi Mekanikal Kalor

(Sumber : www.Fisikazone.com)

Setelah eksperimen Joule, para ilmuwan berpendapat bahwa panas bukanlah materi atau energi; sebaliknya, panas dipandang sebagai transfer energi ketika panas berpindah dari benda panas ke benda yang lebih dingin. Oleh karena itu, mereka menganggap panas sebagai transfer energi karena perbedaan temperatur antara dua objek. Dalam satuan SI, Joule adalah satuan panas. Seperti sebelumnya, kilokalori dan kalori masih digunakan. Definisi kalori Joule masih didasarkan pada sifat-sifat air.

Contoh soal :

Dua pasangan muda menghabiskan terlalu banyak kue dan es krim. Setelah mengetahui bahwa mereka telah menghabiskan lebih dari 500 Kal, mereka akhirnya dapat mengimbangnya dengan menaiki tangga. Berapa ketinggian yang harus dicapai oleh semua individu, jika massa masing-masing individu adalah 60 kilogram.

Penyelesaian :

$$(500 \text{ kkal}) (4,186 \times 10^3 \text{ J/kkal}) = 2,1 \times 10^6 \text{ J.}$$

$$h = \frac{W}{mg} = \frac{2,1 \times 10^6 \text{ J}}{(60 \text{ kg})(9,80 \text{ m/s}^2)} = 3600 \text{ m.}$$

Mereka perlu mendaki gunung yang tinggi (lebih dari 11.000 kaki) atau banyak sekali tangga.

6.2 Energi Thermal

6.2.1 Perbedaan Temperatur, Kalor, dan Energi Termal

Teori kinetik menunjukkan bahwa kita dapat mengetahui bagaimana temperatur, energi internal, dan suhu berbeda satu sama lain. Temperatur dengan satuan Kelvin

(K) merupakan pengukuran rata – rata setiap molekul secara kinetik. Energi total dari semua molekul yang ada di dalam objek disebut energi internal. Akhir sekali, kalor mengacu pada transfer energi, seperti energi termal, dari satu benda ke benda lain sebagai akibat dari perubahan suhu. Oleh karena itu, jika 50 gram air pada suhu 30 °C dicampur atau dicampur dengan 200 gram air pada suhu 25 °C, kalor mengalir dari air yang lebih panas ke air yang lebih dingin, meskipun energi pada suhu rendah lebih tinggi karena jumlah kalor yang jauh lebih besar. Sehingga dapat disimpulkan bahwa aliran kalor tidak bergantung pada energi yang dimiliki kedua benda, tetapi pada temperatur (Dotchi Exerowa and Kruglyakov, 1998).

6.2.2 Gas Ideal dari Energi Termal

Energi termal dari gas monoatom yakni sebesar n mol. Energi termal, U , adalah jumlah energi kinetik translasi dari semua atom. Penjumlahan ini sama dengan rata-rata energi kinetik per molekul dikalikan jumlah total molekul, N :

$$U = N \left(\frac{1}{2} m v^2 \right).$$

Menggunakan persamaan $EK = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} kT$, maka dapat dituliskan sebagai :

$$U = \frac{3}{2} N k T \text{ atau } U = \frac{3}{2} n R T$$

Dimana, n adalah jumlah mol. Sehingga, energi termal dari sebuah gas ideal tergantung hanya kepada temperatur dan jumlah mol dari gas (S. N, 1959).

Bila molekul lebih dari satu atom, maka perlu memperhitungkan energi rotasional dan vibrasional dari molekul juga harus diperhitungkan. Energi internal akan lebih besar dari temperatur yang ditentukan daripada untuk

gas monoatomik, tetapi untuk gas ideal hanya akan berperan sebagai fungsi saja (Suryadharma, 2011).

Energi internal dan gas nyata juga bergantung pada temperatur, tetapi ketika gas nyata menyimpang dari gas ideal, maka energi internal akan bergantung pada volume dan tekanan. Pada benda cair dan pada, energi internalnya sangat kompleks karena akan bergantung pada ikatan kimia antara atom dan molekul (Suryadharma, 2011).

6.3 Kalor Jenis

Pada tahun 1800an, peneliti menemukan bahwa massa m dari material dan perubahan suhu ΔT sebanding dengan jumlah kalor Q yang diperlukan untuk mengubah suhu material tertentu. Hal ini ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$Q = m \times c \times \Delta T$$

Dalam hal ini, c juga disebut sebagai istilah kalor jenis dengan satuan J/kg.Co (sesuai SI) atau kkal/kg.C°. Untuk air pada 15°C dan tekanan tetap 1 atm, $c = 4,19 \times 10^3$ J/kg.C° atau 1,00 kkal/kg.C°. berdasarkan pengertian kalori dan Joule. Tabel 6.1 menunjukkan nilai dan kalor jenis pada 20 °C. Nilai c akan berubah jika suhu berubah, tetapi tetap konstan jika tidak terlalu berubah .

Tabel 6.1 Kalor jenis (pada tekanan 1 atm dan suhu 20°C)

Zat	J/Kg.C°	Kal/g.C°
Aluminium	900	0,22
Alkohol (etil)	2400	0,58
Tembaga	390	0,093

Besi atau baja	450	0,11
Timbal	130	0,031
Marmer	860	0,21
Air raksa	140	0,033
Perak	230	0,056
Kayu	1700	0,4
Air		
Es (- 5°C)	2100	0,50
Cairan (15°C)	4186	1,00
Uap (110°C)	2010	0,48
Tubuh Manusia (Rata – rata)	3470	0,83
Protein	1700	0,4

Sumber: Buku Giancoli

6.3.1 Kalor Jenis untuk Gas

Kalor jenis untuk gas lebih rumit daripada pada benda padat dan cair, di mana volume berubah seiring dengan perubahan temperatur. Perubahan volume gas sangat besar peluang perubahannya ketika temperatur berubah pada tekanan tetap. Sehingga proses perubahan kalor jenis pada gas sangat bergantung dengan perubahan temperaturnya.

6.4 Penyelesaian Soal Menggunakan Kalorimetri

Kalor mengalir dari temperatur tinggi ke rendah dalam sistem yang terisolasi ketika bagian-bagiannya berada pada temperatur yang berbeda. Namun, ketika sistem terisolasi secara keseluruhan, tidak ada kalor yang mengalir ke dalam

atau ke luar. Indikator kekekalan energi menunjukkan bahwa jumlah kalor yang didapat dan dibuang sama. Sebagai contoh, perhatikan soal di bawah ini:

Berapa suhu akhir T campuran ketika ditimbang jika 200 cm³ teh pada 95°C dimasukkan ke dalam cangkir gelas 150 gram pada 25°C? Dengan menganggap tidak ada kalor yang mengalir ke sekitarnya, berapa suhu akhir campuran??

Penyelesaian :

Teh pada dasarnya adalah berupa cairan, maka:

- Nilai kalor jenis yakni 4186 J/Kg.C°
- Massa ditentukan dengan massa dikali volume,

$$V = 200 \text{ cm}^3 = 200 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} m &= V\rho &= (200 \times 10^{-6} \text{ m}^3) (1,0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) \\ & &= 0,20 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Dengan menerapkan kekekalan energi, kita dapat menentukan:

Kalor yang hilang dari teh = Kalor yang diterima oleh cangkir

$$M_{\text{teh}} C_{\text{teh}} (95^\circ\text{C} - T) = m_{\text{cangkir}} C_{\text{cangkir}} (T - 25^\circ\text{C})$$

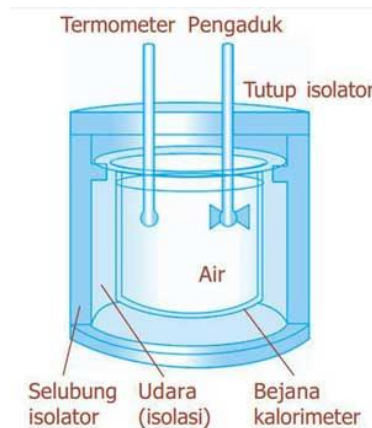
Dimana T adalah temperatur yang masih belum diketahui. Dengan memasukkan angka – angka, maka didapatkan:

$$(0,20 \text{ kg})(4186 \text{ J/Kg.C}^\circ)(95^\circ\text{C} - T) = (0,15 \text{ kg})(840 \text{ J/Kg.C}^\circ)(T - 25^\circ\text{C})$$

$$\begin{aligned} 79.400 \text{ J} - (836 \text{ J/Kg.C}^\circ) T &= (126 \text{ J/Kg.C}^\circ) T - 6300 \text{ J} \\ T &= 89^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Sehingga dikemukakan bahwa suhu teh akan turun sebesar enam derajat untuk mencapai kesetimbangan dengan cangkir.

Contoh di atas merupakan termasuk dalam salah satu metode yang disebut dengan kalorimeter, yakni pertukaran kalor menggunakan pengukuran secara kuantitatif. Kalorimeter merupakan alat untuk melakukan pengukuran ini. Gambar 6.2 menunjukkan ilustrasi sederhana dari kalorimeter air.



Gambar 6.2 Ilustrasi Kalorimeter Air Sederhana
(Sumber : www.Fisikabc.com)

6.5 Kalor Laten

Energi dilepaskan saat materi berubah dari padat ke cair dan air ke gas. Contohnya adalah ketika bongkahan es seberat 1,0 kg dipanaskan dengan kecepatan konstan pada suhu -40°C . Es yang telah berubah menjadi cair, selanjutnya dipanaskan sampai 100°C dan kemudian berubah menjadi uap pada suhu lebih tinggi dari 100°C , semuanya dengan tekanan 1 atm. Setiap kali kalor ditambahkan ke es,

temperatur akan meningkat. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.3, ini terjadi tanpa perubahan temperatur ketika es dalam keadaan cair perlahan berubah menjadi air.



Gambar 6.3 Kalor Laten dan Perubahan Wujud Zat
(Sumber : www.Fisikazone.com)

Tentu saja, kalor yang terlibat dalam perubahan fase dipengaruhi oleh kalor laten dan massa total zat:

$$Q = m \times L$$

Di sini, m adalah massa zat, L adalah kalor latennya, dan Q adalah kalor yang diperlukan atau dikeluarkan selama perubahan fase. Sebagai contoh, ketika lima kilogram air membeku pada suhu negatif maka,

$$\begin{aligned}
 Q &= m \times L \\
 &= (5 \text{ kg}) (3,33 \times 10^5 \text{ J/kg}) \\
 &= 1,67 \times 10^6 \text{ J}.
 \end{aligned}$$

6.6 Perpindahan Kalor

6.6.1 Konduksi

Metode konduksi memungkinkan cairan bergerak dari satu benda ke benda lain. Jika sebuah sendok perak dimasukkan ke dalam semangkuk sop atau tongkat logam digunakan untuk mengatur kayu di perapian, ujungnya akan langsung menjadi panas, bahkan jika ujungnya tidak bersentuhan langsung dengan panas. Kami menyatakan bahwa kalor bergerak dari suhu tinggi ke suhu rendah (Giancoli, 1999).

Tumbukan molekul-molekul menyebabkan banyak materi kehilangan kalor. Molekul di satu sisi suatu benda menjadi lebih cepat dan lebih cepat ketika ujungnya dipanaskan. Saat molekul-molekul ini bertumpuk dengan molekul-molekul yang bergerak lebih lambat, sebagian energi mereka ditransfer ke molekul-molekul lain, yang kemudian bergerak lebih lambat. Oleh karena itu, tumbukan molekul kecil mengirimkan energi gerakan termal. Menurut teori saat ini, logam adalah bahan yang paling konduktif karena tumbukan elektron bebas dengan atom logam (Hasan, 2014).

Konduktivitas termal beberapa zat disimbolkan dengan k . Zat dengan k besar dikenal sebagai konduktor yang baik dan menghantarkan kalor dengan cepat. Walaupun ada perbedaan yang signifikan antara logam, sebagian besar logam termasuk dalam kategori ini, seperti yang ditunjukkan dengan memegang ujung logam tahan karat dalam mangkuk panas yang sama. Zat—Zat-zat dengan k kecil, seperti wol, fiberglass, polyurethane, dan bulu, disebut isolator karena mereka adalah penghantar kalor yang buruk (Shashkov, 1980).

Sederhananya, besar relatif k dapat menjelaskan mengapa lantai ubin lebih dingin di kaki daripada lantai karpet pada suhu yang sama. Dibandingkan dengan karpet, ubin lebih baik sebagai penghantar kalor karena kalor yang ditransfer dari kaki ke karpet tidak dihantarkan kembali dengan cepat, sehingga permukaannya terpanas dengan cepat. Sebaliknya, ubin dapat menerima lebih banyak kalor dari kaki dan menurunkan suhunya (Giancoli, 1999).

Contoh soal:

Jendela adalah sumber utama panas rumah. Hitung kecepatan aliran kalor melalui jendela kaca berukuran dua meter $\times$ 1,5 meter dan tebal 3,2 milimeter dengan suhu permukaan dalam dan luar masing-masing $15,0^\circ\text{C}$ dan $14,0^\circ\text{C}$.

Penyelesaian:

Diketahui,

$$A = 2,0 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} = 3,0 \text{ m}^2$$

$$l = 3,2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

dengan menggunakan Tabel 9.1 untuk mencari k , didapatkan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Q}{\Delta t} &= kA \frac{T_1 - T_2}{l} = \frac{(0,84 \text{ J/s.m.C}^\circ)(3,0 \text{ m}^2)(15,0^\circ\text{C} - 14,0^\circ\text{C})}{(3,2 \times 10^{-3} \text{ m})} \\ &= 790 \text{ J / s} \end{aligned}$$

Ini ekuivalen dengan,

$$= (790 \text{ J/s}) (4,19 \times 10^3 \text{ J/kkal})$$

$$= 0,19 \text{ kkal/s,}$$

atau

$$= (019 \text{ kkal/s}) (3600 \text{ s/jam})$$

$$= 680 \text{ kkal/jam}$$

Jika dilihat pada contoh di atas, suhu 15°C mungkin tidak terlalu panas untuk ruang duduk sebuah rumah; namun, lapisan udara di sekitar jendela berfungsi sebagai isolator, dan sebagian besar perubahan suhu terjadi melalui lapisan udara ini.

Jika angin cukup kencang, udara dingin akan menggantikan udara panas di luar jendela. Karena gradien suhu dan kecepatan kehilangan kalor yang lebih tinggi melintasi kaca, menambah lebar lapisan udara, seperti dua lapis kaca terpisah dari udara, akan memperkecil kehilangan kalor lebih banyak daripada menebalkan kaca jendela. Ini karena kaca memiliki daya konduktivitas termal yang lebih tinggi daripada udara.

Untuk tujuan praktis, sifat panas bahan bangunan, terutama ketika diperhitungkan sebagai isolator, biasanya dinyatakan dengan nilai R (resistensi termal) yang untuk ketebalan l dari suatu materi tertentu didefinisikan sebagai :

$$R = \frac{l}{k}$$

Nilai R untuk sepotong bahan berarti menggabungkan ketebalan l dan konduktivitas termal k dalam satu angka. Di Amerika Serikat, nilai R dinyatakan dalam satuan British, sebagai kaki² jam / F° / Btu. Tabel 6.2 memberikan nilai R untuk beberapa bahan bangunan yang umum. Perlu diperhatikan bahwa nilai R berbanding lurus dengan ketebalan bahan. Sebagai contoh, 2 inci *fiberglass* mempunyai nilai $R = 6$ kaki² jam / F° / Btu, setengah dari R untuk 4 inci.

Tabel 6.2 Nilai R

Zat	Nilai R	
	Ketebalan	kaki ² jam / F° / Btu
Gelas	½ inci	1
Batu bata	3 ½ inci	0,6 – 1
Polywood	½ inci	0,6
Isolasi <i>fiberglass</i>	4 inci	12

Sumber: Buku Giancoli

6.6.2 Konveksi

Pergerakan molekul dari satu tempat ke tempat yang lain terjadi sebagai sebab dari proses di mana kalor ditransfer yang juga disebut dengan Konveksi. Konveksi melibatkan molekul yang bergerak dalam jarak yang lebih besar.

6.6.3 Radiasi

Konduksi dan konveksi membutuhkan adanya materi sebagai medium agar kalor dapat berpindah dari tempat yang lebih panas ke tempat yang lebih dingin. Namun, transfer kalor jenis ketiga terjadi tanpa medium. Energi radiasi adalah cara semua kehidupan di Bumi ditransfer ke Bumi melalui ruang hampa. Karena suhu Matahari jauh lebih tinggi dari Bumi, sebagian besar udara yang dipanaskan oleh api naik ke atas cerobong asap dan tidak mencapai kita karena konveksi.

Seseorang menemukan bahwa kecepatan sebuah benda meradiasikan energi sebanding dengan pangkat empat temperatur Kelvin dengan satuan T. Sebuah benda pada 2000 K meradiasikan energi dengan kecepatan 24 kali lipat lebih

besar daripada benda pada 1000 K, sehingga kecepatan energi yang meninggalkan benda adalah:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = e\sigma AT^4$$

Persamaan ini dikenal sebagai persamaan Stefan-Boltzmann, dan konstanta umum σ , yang dikenal sebagai konstanta Stefan-Boltzmann, memiliki nilai :

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/m^2.K^4$$

Emisivitas, yang merupakan bilangan antara 0 dan 1, adalah faktor e . Jika permukaan yang sangat hitam, seperti arang, memiliki e yang mendekati nol, mereka akan memancarkan radiasi yang lebih kecil. Nilai e bergantung pada suhu benda sampai batas tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- Dotchi Exerowa and Kruglyakov, P.M. (1998) 'Technological Application of Foams: Physicochemical Ground', *Studies in Interface Science*, 5, pp. 656–737.
- Giancoli, D.C. (1999) *Fisika*. I. Edited by H. Wibi. Jakarta: Erlangga.
- Hasan, Y. (2014) 'Fisika dalam Perspektif: Suatu Tinjauan Perkembangan dan Peran Masyarakat', *Jakarta: Pusat Pengkajian Teknologi Nuklir, Badan ...* [Preprint], (June 1997). Available at:
https://www.researchgate.net/profile/Yaziz-Hasan/publication/292788440_FISIKA_DALAM_PERSPEKTIF_SUATU_TINJAUAN_PERKEMBANGAN_DAN_PERAN_MASYARAKAT/links/56b158a408ae795dd5c50458/FISIKA-DALAM-PERSPEKTIF-SUATU-TINJAUAN-PERKEMBANGAN-DAN-PERAN-MASYARAKAT.pdf.
- S. N, P. (1959) 'Time Dependent Thermal-Neutron Energy Spectra in a Monoatomic Heavy Gas'.
- Shashkov, A.G. (1980) 'Identifying the thermophysical properties of substances', *Journal of Engineering Physics*, 39(3), pp. 942–951. Available at:
<https://doi.org/10.1007/BF00825916>.
- Suryadharma, I. (2011) 'Simetri Molekul, Dasar-dasar Spektroskopi, dan Mekanika Kuantum', *Repository.Ut.Ac.Id*, pp. 1–43. Available at:
<http://repository.ut.ac.id/4664/2/PEKI4315-M1.pdf>.

BAB 7

KAPASITAS PANAS

Oleh Jan Setiawan

7.1 Kapasitas Panas

Dalam kehidupan sehari-hari, apabila memanaskan suatu zat akan terjadi perubahan karakteristik zat tersebut, salah perubahan yang dapat dirasakan langsung adalah perubahan temperatur. “Perubahan temperatur bergantung kapasitas panas zat; apabila jumlah panas (kalor) yang diberikan sama, kenaikan temperatur suatu zat yang rendah dikatakan kapasitas panas yang besar, dan zat yang mengalami kenaikan temperatur yang tinggi dikaitkan dengan kapasitas panasnya yang kecil (Dehli, Doering dan Schedwill, 2022)”. Kalor merupakan energi yang mengalir antara sistem dengan lingkungannya di mana terjadi perbedaan temperatur diantara keduanya, dan diberikan simbol Q . “Kalor bernilai positif apabila energi diberikan ke dalam sistem energi termal dari lingkungannya. Kalor yang bernilai negatif ketika energi mengalir dari sistem termal ke lingkungannya (Halliday, Resnick, dan Walker, 2017; Rismaningsih, Setiono, Gideon, Sujarwanto, Nurwijayanti, Irwanto, Malik dan Setiawan, 2021)”. Satuan Internasional untuk kalor sama dengan satuan dari energi yaitu joule (diberi simbol J). Konversi dengan satuan kalor lainnya diberikan sebagai berikut,

$$1 \text{ kalori} = 3,968 \times 10^{-3} \text{ Btu} = 4,1868 \text{ J}$$

Selama tidak ada perubahan fasa kapasitas panas dapat dituliskan dengan,

$$C = \frac{\partial Q}{\partial T} \quad (7.1)$$

Kapasitas panas (C) dari suatu zat sebanding dengan kalor Q yang diserap atau yang dilepas dan mengakibatkan terjadi perubahan temperatur ΔT , secara matematis dituliskan sebagai,

$$Q = C \Delta T = C(T_{akhir} - T_{awal}) \quad (7.2)$$

Kapasitas panas memiliki satuan energi per satuan temperatur, derajat Celcius atau Kelvin. Perpindahan panas dapat terjadi sepanjang perbedaan temperatur yang dibutuhkan terjadinya perpindahan panas dapat tetap dijaga. Tentunya sangat dimungkinkan selama proses terjadi perpindahan panas zat akan meleleh atau mengalami penguapan.

Dua zat dengan kandungan zat yang sama, akan memiliki kapasitas panas yang sebanding dengan massa-nya. Kapasitas panas yang tidak bergantung pada massa zat m dikenal sebagai kapasitas panas spesifik c , di mana satuannya energi per satuan massa dan temperatur. Secara matematis dituliskan sebagai,

$$Q = c m \Delta T = c m (T_{akhir} - T_{awal}) \quad (7.3)$$

Pada Tabel 7.1 diberikan kapasitas panas spesifik zat pada temperatur kamar.

Tabel 7.1. Kapasitas panas spesifik beberapa zat pada temperatur kamar.

Zat	Kapasitas panas spesifik J/(kg.K)
Timbal	128
Tungsten	134
Perak	236
Tembaga	386
Aluminium	900
Kuningan	380
Granit	790
Gelas	840
Merkuri	140
Etanol	2340
Air	4187

Sumber: Halliday, Resnick, dan Walker, 2017.

Dalam penentuan dan penggunaan kapasitas spesifik suatu zat harus diketahui dengan pasti dari energi apa yang alirkan sebagai kalor. Dalam zat padat dan cair asumsi yang digunakan kedua zat ini berada dalam kondisi tekanan konstan selama proses transfer energi. Selain itu dapat memungkinkan juga zat tersebut dijaga pada volume konstan dengan memberikan tekanan dari luar supaya tidak ada pemuaian saat kalor diserap. Pada zat padat dan cair kapasitas panas spesifik pada tekanan konstan dan volum

konstan tidak terlalu besar selisihnya. Lain halnya dengan gas yang memiliki kapasitas panas spesifik pada tekanan konstan yang berbeda dengan pada volum konstan. Kapasitas panas spesifik untuk gas dipengaruhi oleh jenis gas, temperatur, tekanan dan jenis perubahan keadaannya (Dehli, Doering dan Schedwill, 2022). Untuk gas ideal tidak dipengaruhi oleh tekanan. Gas ideal hanya dipengaruhi oleh jenis perubahan keadaannya.

Pada perpindahan panas sebagaimana terjadi perubahan energi internal tidak ada perubahan kerja ($W = 0$). Perubahan kalornya dapat dituliskan sebagai,

$$\partial Q = \partial U + \partial W = \partial U = c_v dT \quad (7.4)$$

$$c_v \equiv \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad (7.5)$$

Dengan demikian energi internalnya dapat dituliskan sebagai,

$$U = \int c_v(T, V) dT \quad (7.6)$$

jika c_v bernilai konstan dalam rentang T_1 dan T_2 maka

$$U = c_v(T_2 - T_1) \quad (7.7)$$

Perpindahan panas sebagaimana terjadinya perubahan entalpi, besaran kerjanya sebanding dengan tekanan yang diberikan dan perubahan volum yang terjadi ($W = PdV$)

$$\partial Q = \partial U + \partial W = \partial U + PdV = \partial H = c_p dT \quad (7.8)$$

$$c_p \equiv \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (7.9)$$

Dengan demikian entalpinya dapat dituliskan sebagai,

$$H = \int c_p(T, P) dT \quad (7.10)$$

jika c_p bernilai konstan dalam rentang T_1 dan T_2 maka

$$H = c_p(T_2 - T_1) \quad (7.11)$$

Hubungan antara kedua kapasitas tersebut apabila V sebagai fungsi dari P dan T , $V(P, T)$ dapat diperoleh,

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T dP \quad (7.12)$$

dengan melakukan substitusi dengan persamaan 7.8 dan proses yang dilakukan dalam kondisi tekanan konstan, secara matematis dapat dituliskan sebagai,

$$\frac{c_p - c_v}{\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P} = p + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \quad (7.13)$$

yang mana menggambarkan hubungan kapasitas panas pada tekanan konstan dan volum konstan.

Pada gas ideal berlaku persamaan berikut (Potter dan Somerton, 2014; Borgnakke, dan Sonntag, 2022),

$$PV = nRT \quad (7.14)$$

$$\partial H = \partial U + \partial(PV) \quad (7.15)$$

$$c_p dT = c_v dT + R dT \quad (7.16)$$

dengan membagi persamaan 7.16 dengan dT , diperoleh

$$c_p = c_v + R \quad (7.17)$$

dalam bentuk molar ekivalennya dapat dituliskan sebagai,

$$\bar{c}_p = \bar{c}_v + R \quad (7.18)$$

Karakteristik lainnya yang menghubungkan kapasitas panas spesifik pada volum konstan dengan tekanan konstan

diberikan nilai rasio kapasitas panas spesifik k yang didefinisikan dengan,

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (7.19)$$

dengan mensubstitusikan dengan persamaan 7.17 ke persamaan 7.19 diperoleh,

$$c_p = R \frac{k}{k-1} \quad (7.20)$$

atau

$$c_v = \frac{R}{k-1} \quad (7.21)$$

Data beberapa kapasitas panas spesifik gas ideal sebagai fungsi temperatur hingga pangkat tiga diberikan pada Tabel 7.2.

Tabel 7.2 Kapasitas panas spesifik gas ideal sebagai fungsi temperatur.

Gas	a	b	c	d
Udara	28,110	0,0019670	$0,4802 \times 10^{-5}$	$-1,9660 \times 10^{-9}$
N ₂	29,900	-0,0015710	$0,8081 \times 10^{-5}$	$-2,8730 \times 10^{-9}$
O ₂	25,480	0,0152000	$-0,7155 \times 10^{-5}$	$1,3120 \times 10^{-9}$
H ₂	29,110	-0,0019160	$0,4003 \times 10^{-5}$	$-0,8704 \times 10^{-9}$
CO	28,160	0,0016750	$0,5372 \times 10^{-5}$	$-2,2220 \times 10^{-9}$
NO	29,340	-0,0009395	$0,9747 \times 10^{-5}$	$-4,1870 \times 10^{-9}$
H ₂ O	32,240	0,0019230	$1,0550 \times 10^{-5}$	$-3,5950 \times 10^{-9}$
CO ₂	22,260	0,0598100	$-3,5010 \times 10^{-5}$	$7,4690 \times 10^{-9}$

Gas	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
NO ₂	22,900	0,0571500	-3,5200×10 ⁻⁵	7,8700×10 ⁻⁹

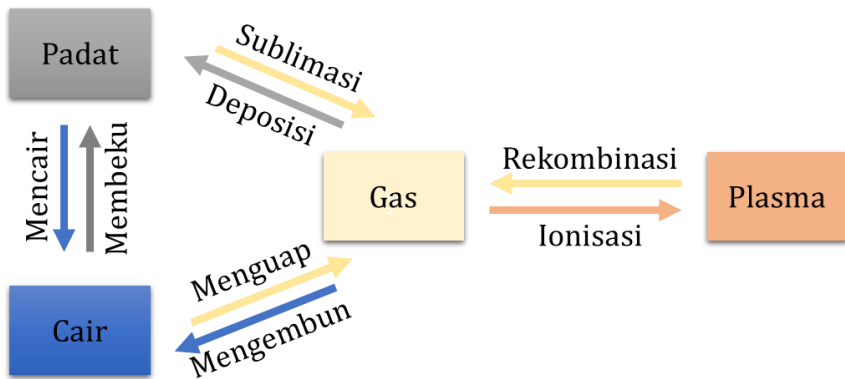
$$\bar{c}_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (7.22)$$

satuan dari T adalah K, dan $\bar{c}_p$ dalam kJ/kmol·K.

Sumber: Potter dan Somerton, 2014.

7.2 Kalor Transformasi

Energi yang diserap oleh zat padat dan zat cair dalam bentuk panas sangat dimungkinkan tidak terjadi perubahan temperatur. Energi yang diserap ini akan mengubah dari satu fasa, atau keadaan ke fasa lainnya. Suatu zat dapat berada dalam tiga keadaan yang umum, yaitu padat, cair atau gas. Bentuk ke empat suatu zat adalah plasma. Pada keadaan berbentuk padat molekul dari zat akan terikat dalam struktur yang tegar akibat gaya interaksi sesamanya. Cairan memiliki ikatan molekul yang lebih mudah bergerak. Zat cair tidak memiliki struktur yang tegar sehingga dapat mengalir dan mengikuti bentuk wadah penampungnya. Sedangkan dalam keadaan gas atau uap, molekul memiliki energi yang lebih tinggi, molekulnya saling terbebas satu dengan lainnya dan dapat memenuhi wadah penampungnya.



Gambar 7.1 Transformasi fasa padat, cair, gas dan plasma

Ilustrasi perubahan fasa pada zat diberikan oleh diagram pada Gambar 7.1. Perubahan zat dari fasa padat ke fasa cair disebut dengan mencair/meleleh. Proses mencair ini memerlukan energi yang dibutuhkan molekul zat padat untuk memutus ikatannya dari struktur tegarnya, contoh proses ini yang paling umum adalah mencairkan es. Proses kebalikan dari mencair adalah membeku, dimana zat dalam fasa cair berubah menjadi fasa padat. Proses membeku energi dilepaskan dari zat, sehingga molekul dapat menempati posisi dalam struktur tegarnya. Proses perubahan zat dari fasa cair menjadi gas disebut menguap. Proses penguapan serupa dengan proses mencair/meleleh yang memerlukan energi karena energi ini dibutuhkan molekul untuk membebaskan ikatan antar molekulnya. Dalam kehidupan sehari-hari, penguapan dapat diamati ketika memanaskan air hingga mendidih. Perubahan zat dari fasa gas menjadi fasa cair sebagai kebalikan dari penguapan disebut dengan kondensasi. Pemanasan zat dengan fasa gas hingga menjadi fasa plasma, prosesnya disebut sebagai

ionisasi. Sedangkan kembalinya zat dari fasa plasma ke fasa gas dikenal dengan rekombinasi.

Sejumlah energi per satuan massa yang digunakan zat untuk berubah fasanya dikenal dengan kalor transformasi L (Halliday, Resnick, dan Walker, 2017). Sehingga kalor Q yang digunakan zat dengan massa m untuk berubah fasa dituliskan dengan,

$$Q = Lm \quad (7.23)$$

Beberapa informasi kalor lebur dan kalor didih dari beberapa zat beserta temperaturnya diberikan pada Tabel 7.3

Tabel 7.3 Kalor transformasi dari beberapa zat.

Zat	Titik Lebur (K)	Kalor Lebur (kJ/kg)	Titik Didih (K)	Kalor Penguapan (kJ/kg)
Hidrogen	14	58	20.3	455
Oksigen	54.8	13.9	90.2	213
Merkuri	234	11.4	630	296
Air	273	333	373	2256
Timbal	601	23.2	2017	858
Tembaga	1356	207	2868	4730
Perak	1235	105	2323	2336

Sumber: Halliday, Resnick, dan Walker, 2017

7.3 Pengukuran Kapasitas Panas Spesifik

Penentuan kapasitas panas sebagai karakteristik dari suatu bahan dalam tekanan konstan dalam proses kesetimbangan jumlah kalor diserap dapat ditentukan melalui persamaan 7.10 yang dituliskan kembali sebagai,

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} c_p(T, P) dT \quad (7.24)$$

apabila nilai c_p tidak berubah atau bervariasi pada rentang temperatur tersebut, dapat dituliskan seperti persamaan 10.3 yang dituliskan kembali dalam,

$$Q = mc_p(T_2 - T_1) \quad (7.25)$$

Pengukuran kapasitas panas spesifik pada tekanan konstan suatu bahan dilakukan melalui proses kalorimeter, dimana bahan uji diberikan perbedaan panas pada kedua sisi berlawanan di mana salah satunya adalah sisi panas H dengan temperatur T_H dan sisi lainnya adalah sisi dingin C pada temperatur T_C . Proses ini terjadi dalam kondisi yang terisolasi secara termal hingga mencapai temperatur akhir T . Dalam proses kesetimbangan dari sebuah sistem termodinamika laju perpindahan panas ke dalam sistem sebanding dengan laju kalor yang diserap oleh sistem (Whitman, 2020). Proses kalorimeter terdiri atas empat proses yang menggambarkan interaksi termal dari dua sistem. Dalam kondisi akhir dua massa dan tekanan tidak berubah sementara kedua temperatur bernilai sama. Kesetimbangan temperatur pada kondisi akhir dapat dituliskan sebagai (Whitman, 2020),

$$T - T_L = \frac{T_H - T_L}{1+r} \quad (7.26)$$

di mana untuk r adalah rasio massa termal yang dirumuskan dengan,

$$r = \frac{m_L c_{pL}}{m_H c_{pH}} \quad (7.27)$$

Untuk kapasitas panas spesifik pada volum konstan dalam proses kesetimbangan jumlah kalor diserap dapat ditentukan melalui persamaan 7.6 yang dituliskan kembali sebagai,

$$Q = m \int_{T_1}^{T_2} c_v(T, V) dT \quad (7.28)$$

Untuk rentang temperatur yang kecil dengan nilai c_v yang konstan. Integral pada persamaan 7.24 akan menjadi,

$$Q = mc_v(T_2 - T_1) \quad (7.29)$$

Dalam proses kalorimetrik, dari salah satu zat dengan massa m_v yang dikenai proses volum konstan dari temperatur T_{1v} , ditempatkan dan memiliki kontak termal dengan zat lain yang memiliki massa m_p yang dikenai dengan proses tekanan konstan dari temperatur T_{1p} . Jika temperatur kesetimbangan adalah T maka diperoleh,

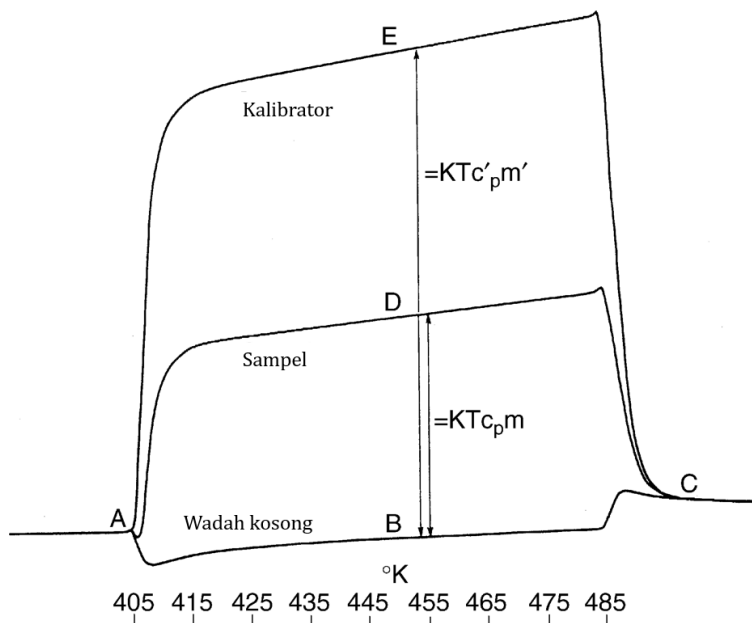
$$m_v c_v (T - T_{1v}) + m_p c_p (T - T_{1p}) = 0 \quad (7.30)$$

$$c_v = -m_p (T - T_{1p}) / [m_v (T - T_{1v})] c_p = 0 \quad (7.30)$$

Untuk cairan, padatan dan gas ideal, nilai dari c_v juga diketahui hanya bergantung pada temperatur. Untuk cairan dan padatan pengukuran c_v sangat sulit, karena diperlukan tekanan yang tinggi untuk mempertahankan volum konstan (Whitman, 2020).

Perangkat yang digunakan untuk pengukuran kapasitas panas pada tekanan tetap adalah *differential scanning calorimeter* (DSC) atau *differential thermal analysis* (DTA). Kedua perangkat ini secara umum dapat mendeteksi temperatur transisi, perubahan entalpi dan kapasitas panas. Temperatur transisi diperoleh dengan melakukan ekstrapolasi dari temperatur awal, dan entalpi transisi

ditentukan dengan melakukan integrasi dari sinyal yang diperoleh menggunakan metode tertentu untuk transisi gelas. Metode pemindaian merupakan salah satu metode yang umum digunakan dalam menentukan kapasitas panas dengan DSC. Pengukuran dilakukan tiga langkah, pertama pengukuran wadah kosong, kedua pengukuran wadah berisi bahan kalibrator dan ketiga pengukuran wadah yang berisi bahan/sampel uji yang akan ditentukan kapasitas panasnya. Pengukuran ketiganya dilakukan pada rentang temperatur dan laju pemanasan yang sama. Dari proses yang dilakukan diperoleh tiga sinyal $S_{data}^{kosong}(t)$, $S_{data}^{kalibrator}(t)$ dan $S_{data}^{sampel}(t)$. Ilustrasi dari ketiga data yang diperoleh diberikan pada Gambar 7.2 di bawah ini.



Gambar 7.2. Sinyal data dari DSC untuk penentuan kapasitas panas.
(Sumber: Richardson, 1984, 1992; courtesy of Perkin-Elmer dalam Kauffman, 2003)

Kurva ABC dalam Gambar 7.2 merupakan sinyal $S_{data}^{kosong}(t)$. Untuk kurva ADC merupakan sinyal $S_{data}^{sampel}(t)$. Sedangkan kurva AEC merupakan sinyal $S_{data}^{kalibrator}(t)$. Selisih kurva ADC dengan ABC diberikan dalam $S^{sampel}(t)$, dan selisih kurva AED dengan ABC diberikan dalam $S^{kalibrator}(t)$. Kapasitas panas sampel $c_p(t)$ ditentukan dengan persamaan 7.31 berikut,

$$c_p(t) = c_p^{kalibrator}(t) \frac{S^{sampel}(t)}{S^{kalibrator}(t)} \quad (7.31)$$

DAFTAR PUSTAKA

- Borgnakke, C. dan Sonntag, R.E., 2022. Fundamentals of thermodynamics. John Wiley & Sons.
- Dehli, M., Doering, E. dan Schedwill, H., 2022. The First Law of Thermodynamics. In *Fundamentals of Technical Thermodynamics: Textbook for Engineering Students* (pp. 9-42). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Halliday, D., Resnick, R. dan Walker, J., 2017. *Fundamentals of Physics, Extended, 11ed*. John Wiley & Sons.
- Kaufmann, E.N., 2003. *Characterization of Materials, 2 Volume Set*. John Wiley & Sons
- Potter, M.C. dan Somerton, C.W., 2014. *Schaum's outline of thermodynamics for engineers*. McGraw-Hill Education.
- Rismaningsih, F., Setiono, F.E., Gideon, S., Sujarwanto, E., Nurwijayanti, K.N., Irwanto, R., Malik, Y. dan Setiawan, J., 2021. *Fisika Dasar Mekanika*. Media Sains Indonesia.
- Whitman, A.M., 2020. *Thermodynamics: basic principles and engineering applications*. Springer.

BAB 8

HUKUM I TERMODINAMIKA

Oleh Fahmy Rinanda Saputri

8.1 Pendahuluan

Termodinamika adalah cabang ilmu fisika yang mempelajari tentang energi, perubahan energi, dan hubungannya dengan materi. Istilah "termodinamika" berasal dari bahasa Yunani, yaitu "thermo" yang berarti panas, dan "dynamis" yang berarti gerak atau kekuatan. Termodinamika membahas tentang bagaimana energi berinteraksi dengan sistem fisik dan lingkungannya, serta bagaimana perubahan energi tersebut mempengaruhi sistem tersebut.

Hukum Termodinamika Pertama

Hukum termodinamika pertama, juga dikenal sebagai hukum kekekalan energi, menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dihancurkan dalam suatu sistem terisolasi. Total energi dalam sistem termodinamika tertutup tetap konstan. Energi hanya dapat berubah bentuk dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Hukum ini membentuk dasar dalam pemahaman tentang transfer energi dalam bentuk panas dan kerja, serta perubahan energi internal sistem.

Hukum Termodinamika Kedua

Hukum termodinamika kedua menyatakan tentang konsep entropi dan arah alami perubahan dalam sistem termodinamika. Entropi adalah ukuran dari ketidakteraturan atau ketidatanaman dalam sistem. Hukum ini menyatakan bahwa dalam sistem terisolasi, entropi akan cenderung meningkat seiring waktu, sehingga sistem akan bergerak menuju keadaan yang lebih acak dan tidak teratur. Hukum termodinamika kedua juga menyatakan bahwa tidak ada proses yang dapat berlangsung sendiri dari keadaan lebih teratur ke keadaan lebih teratur tanpa ada intervensi dari luar.

Dua hukum termodinamika ini merupakan prinsip dasar yang berlaku di seluruh alam semesta dan menjadi dasar bagi banyak aplikasi dalam ilmu fisika, kimia, teknik, dan bidang lainnya. Dalam kehidupan sehari-hari, hukum-hukum ini berlaku dalam berbagai proses, seperti dalam sistem pemanas, pendingin, mesin, reaksi kimia, dan banyak fenomena alam lainnya. Pemahaman tentang termodinamika sangat penting dalam pengembangan teknologi, pemodelan sistem kompleks, dan menjelaskan banyak peristiwa alam yang kita temui setiap hari.

Namun, pada bab ini akan dibahas lebih khusus terkait Hukum Termodinamika Pertama. Hukum Termodinamika Pertama adalah salah satu prinsip mendasar dalam termodinamika yang membahas tentang konservasi energi dalam sistem fisik. Hukum ini menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dihancurkan, namun dapat berubah bentuk dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Dengan kata lain, jumlah total energi di dalam sistem terisolasi akan tetap konstan.

Konsep konservasi energi menjadi inti dari Hukum Termodinamika Pertama. Hukum ini menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dihancurkan dalam sistem tertutup. Sebagai gantinya, energi dapat berpindah dari satu bentuk ke bentuk lainnya, seperti dari energi kinetik menjadi energi potensial, atau dari energi panas menjadi energi mekanik. Hal ini mengajarkan kita pentingnya memahami bagaimana energi berubah dalam sistem dan bagaimana setiap perubahan energi berdampak pada sistem secara keseluruhan.

Dalam bab ini, kami akan membahas peran penting energi dalam sistem fisik dan bagaimana energi termodinamika didefinisikan. Pengenalan tentang konsep energi kinetik dan energi potensial akan menjadi landasan bagi pemahaman lebih lanjut tentang perubahan energi dalam sistem. Kami juga akan mengeksplorasi bagaimana pekerjaan dan panas terkait erat dengan Hukum Termodinamika Pertama dan bagaimana keduanya berperan dalam mengubah energi dalam sistem.

Selain itu, bab ini akan menghadirkan contoh-contoh aplikasi Hukum Termodinamika Pertama dalam kehidupan sehari-hari. Kita akan melihat bagaimana prinsip ini bekerja dalam berbagai mesin dan proses industri, dari pembangkit listrik hingga mesin pendingin. Dengan pemahaman yang baik tentang hukum ini, kita dapat mengoptimalkan penggunaan energi dan memahami lebih baik bagaimana energi digunakan dan diubah dalam sistem teknologi modern.

Secara umum, hukum pertama termodinamika menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dihancurkan, tetapi dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Total energi di alam semesta tetap konstan.

Sebagai contoh, kita tidak dapat menciptakan energi kinetik untuk menggerakkan turbin air. Namun, kita dapat mengubah energi potensial air menjadi energi kinetik yang digunakan untuk menggerakkan turbin (Kamran & Fazal, 2021).

Secara termodinamika, hukum pertama termodinamika dapat diungkapkan sebagai berikut: ketika sejumlah panas ditambahkan ke dalam sistem, sebagian dari energi tersebut digunakan untuk melakukan pekerjaan yang berguna, sementara sisanya digunakan untuk meningkatkan energi internal sistem. Secara matematis, hukum ini dapat ditulis sebagai berikut:

$$Q = \Delta U + W \quad (1)$$

Dari persamaan di atas, kita dapat mendefinisikan perubahan energi internal sebagai energi yang ditambahkan ke sistem dikurangi dengan kerja yang dilakukan oleh sistem. Secara matematis, hal ini dapat ditulis dalam Persamaan:

$$\Delta U = Q - W \quad (2)$$

Beberapa ciri hukum termodinamika pertama adalah:

1. Prinsip Kekekalan Energi: Hukum termodinamika pertama, juga dikenal sebagai prinsip kekekalan energi, menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dihancurkan. Dalam suatu sistem terisolasi, total energi sistem akan tetap konstan. Energi hanya dapat mengalami perubahan bentuk dari satu bentuk ke bentuk lain, seperti dari energi panas ke energi mekanik atau energi listrik.
2. Konversi Panas dan Kerja: Hukum termodinamika pertama menggambarkan hubungan antara panas dan

kerja dalam suatu sistem termodinamika. Ketika panas ditambahkan atau dihilangkan dari sistem, sebagian energi dapat digunakan untuk melakukan kerja mekanik, dan sisanya akan meningkatkan atau mengurangi energi internal sistem.

3. Energi Internal Sistem: Hukum termodinamika pertama memperkenalkan konsep energi internal sistem, yaitu total energi mikroskopis dari partikel-partikel yang membentuk sistem. Perubahan energi internal sistem dapat diakibatkan oleh perubahan suhu atau perubahan keadaan energi lainnya.
4. Pertukaran Energi Panas: Hukum termodinamika pertama menjelaskan bagaimana panas dapat mengalir dari suatu sistem ke sistem lain atau dari sistem ke lingkungan sekitarnya. Panas dapat berpindah antara sistem dan lingkungannya selama proses termodinamika.
5. Penggunaan dalam Analisis Proses Termodinamika: Hukum termodinamika pertama adalah salah satu dasar dalam analisis proses termodinamika. Hal ini memungkinkan untuk menghitung kerja yang dilakukan, energi yang ditransfer dalam bentuk panas, dan perubahan energi internal sistem selama proses termodinamika tertentu.
6. Termodinamika dan Energi: Hukum termodinamika pertama memiliki keterkaitan erat dengan konsep energi dalam termodinamika. Ia membantu dalam memahami bagaimana energi berinteraksi dengan sistem dan lingkungan, serta bagaimana energi berubah dalam berbagai proses.

8.2 Proses Isotermal

Proses isotermal adalah jenis proses termodinamika di mana perubahan terjadi pada suatu sistem dengan tetap menjaga suhu tetap konstan. Dalam proses isotermal, sistem berinteraksi dengan lingkungannya sedemikian rupa sehingga suhu sistem tidak berubah.

Pentingnya proses isotermal terletak pada pengaturan suhu tetap, yang mengizinkan sistem untuk mencapai kesetimbangan termal dengan lingkungannya. Hal ini menyiratkan bahwa perubahan energi internal dalam sistem akan menjadi nol, karena tidak ada perubahan suhu. Oleh karena itu, dalam proses isotermal, energi panas yang ditambahkan ke sistem secara tepat dikompensasi oleh pekerjaan yang dilakukan oleh sistem, atau sebaliknya.

Contoh penerapan proses isotermal adalah ideal gas yang terkandung dalam silinder dengan dinding isolasi termal yang tipis. Ketika gas dikompresi secara perlahan dan ekspansi dilakukan pada suhu tetap, maka proses tersebut dapat dianggap sebagai isotermal. Selama ekspansi, gas menerima panas dari lingkungan untuk melakukan pekerjaan pada sekitarnya sehingga menjaga suhu tetap konstan.

Hukum Boyle dan hukum Charles adalah contoh lain dari proses isotermal. Hukum Boyle menyatakan bahwa pada suhu tetap, tekanan dan volume gas berbanding terbalik ketika jumlah molekul gas konstan. Sedangkan, hukum Charles menyatakan bahwa pada suhu tetap, volume gas berbanding lurus dengan suhunya jika jumlah molekul gas tetap.

Proses isothermal memiliki beberapa aplikasi penting dalam kehidupan sehari-hari dan industri. Misalnya, dalam mesin uap, proses isothermal digunakan untuk menjaga suhu tetap konstan sehingga energi panas yang ditambahkan dikonversi menjadi energi mekanik dengan efisiensi yang lebih baik. Selain itu, pemrosesan gas dan reaksi kimia tertentu juga dapat dilakukan pada suhu isothermal untuk mengoptimalkan hasil akhir dan efisiensi proses tersebut.

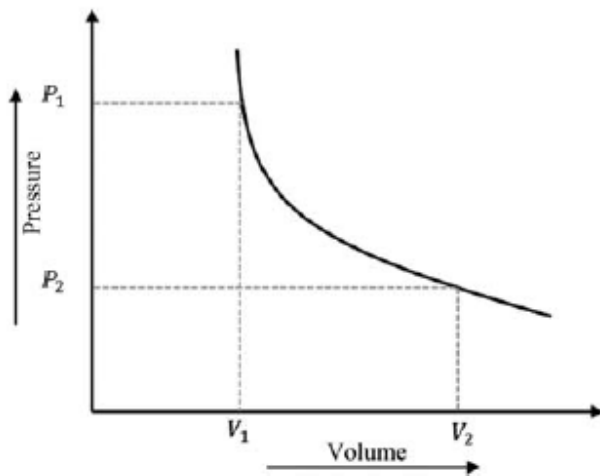
8.2.1 Persamaan matematis proses isothermal

Proses termodinamika yang terjadi pada suhu konstan disebut proses isothermal. Ketika panas secara perlahan masuk atau keluar dari sistem, sistem tampak berada dalam kesetimbangan. Misalkan ada suatu sistem bekerja pada suhu T_1 , volume V_1 , dan tekanan P_1 pada waktu t_1 . Dengan menjaga suhu sistem tetap konstan, kita menambahkan panas Q ke dalam sistem yang menyebabkan volume sistem menjadi V_2 dan tekanan sistem menjadi P_2 pada waktu t_2 . Karena suhu sistem dijaga tetap konstan ($\Delta T = 0$), maka tidak ada perubahan dalam energi internal sistem ($\Delta U = 0$). Jika kita masukkan $\Delta U = 0$ ke dalam persamaan hukum termodinamika pertama, maka kita mendapatkan $Q = W$, yang menjelaskan bahwa seluruh panas yang ditambahkan ke dalam sistem telah digunakan untuk melakukan kerja eksternal. Dalam proses isothermal ini, pekerjaan yang dilakukan dapat dihitung sebagai berikut. Untuk menghitung kerja yang dilakukan oleh sistem selama suatu proses, dapat ditentukan menggunakan Persamaan:

$$W = P \cdot V \quad (3)$$

Untuk proses isothermal, kerja dapat dihitung dengan mencari luas di bawah diagram tekanan-volume yang ditunjukkan dalam Gambar 8.1 dan dihitung dengan Persamaan sebagai berikut:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV \quad (4)$$



Gambar 8.1 Grafik proses isothermal

Sumber : (Kamran & Fazal, 2021)

Dengan persamaan gas umum, kita mengetahui hubungan antara $P=nRT/V$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} \cdot dV$$

$$W = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} \cdot dV$$

$$W = nRT \cdot \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (5)$$

Persamaan di atas digunakan untuk menghitung kerja dari isothermal.

8.2.2 Contoh kasus proses isothermal

Satu mol gas ideal yang di segel dalam sebuah silinder mengalami ekspansi isothermal hingga lima kali lipat dari volume aslinya, yaitu 1 m^3 , pada suhu 290 K dengan secara perlahan memindahkan panas ke gas.

1. Berapakah tekanan awal dan akhir dari gas tersebut?
2. Berapa banyak panas yang dipindahkan ke gas tersebut?

Penyelesaian:

1. Tekanan awal dan akhir gas dapat ditemukan menggunakan persamaan gas umum $PV = nRT$.
Diketahui data:

$$n = 0.1 \text{ mole}$$

$$V_i = 1 \text{ m}^3$$

$$V_f = 5 \text{ m}^3$$

$$T = 290 \text{ K}$$

$$P_i = \frac{nRT}{V_i}$$

$$P_i = \frac{(0.1 \text{ mol})(8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(290 \text{ K})}{1 \text{ m}^3}$$

$$P_i = 241 \text{ Pa}$$

Demikian pula, persamaan gas umum digunakan untuk menghitung tekanan akhir gas pada 5 m³.

$$P_f = \frac{nRT}{V_f}$$

$$P_f = \frac{(0.1 \text{ mol})(8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(290 \text{ K})}{5 \text{ m}^3}$$

$$P_f = 48.22 \text{ Pa}$$

2. Ketika gas ideal mengalami ekspansi secara isothermal, tidak ada perubahan dalam energi internal yang terjadi, yaitu $\Delta U = 0$, sehingga $Q = W$. Untuk menghitung pekerjaan yang dilakukan dalam proses isothermal yang akan sama dengan jumlah panas yang dipindahkan ke gas, kita gunakan persamaan:

$$Q = W = nRT \cdot \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$$

$$Q = (0.1 \text{ mol})(8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(290 \text{ K}) \cdot \ln\left(\frac{5 \text{ m}^3}{1 \text{ m}^3}\right)$$

$$Q = 388 \text{ J}$$

8.3 Proses Isobarik

Proses isobarik adalah salah satu jenis proses termodinamika yang penting, di mana tekanan sistem dijaga tetap konstan selama perubahan yang terjadi. Dalam proses ini, sistem dapat bertukar panas dengan lingkungannya, tetapi tekanannya tetap sama.

Karakteristik utama dari proses isobarik adalah bahwa tekanan sistem selalu dijaga pada nilai yang sama sepanjang perubahan yang terjadi. Hal ini berarti, ketika sistem berinteraksi dengan lingkungannya dan terjadi perubahan suhu atau volume, tekanan sistem tidak berubah. Oleh karena itu, proses isobarik sering juga disebut sebagai proses konstan tekanan.

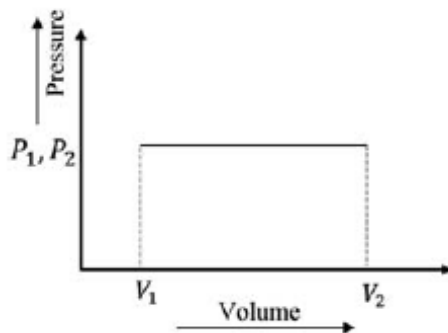
Salah satu contoh penerapan proses isobarik adalah dalam sistem pemanasan atau pendinginan gas dalam wadah yang fleksibel. Misalnya, ketika kita memanaskan gas dalam balon, tekanan balon tetap konstan karena dinding balon yang fleksibel memungkinkan gas untuk diperluas tanpa perubahan tekanan. Dalam proses ini, ketika gas dipanaskan, volumenya akan meningkat, tetapi tekanan tetap sama.

Diagram tekanan-volume (PV) untuk proses isobarik menunjukkan garis lurus horizontal yang menunjukkan tekanan tetap selama perubahan volume. Proses ini juga berlaku dalam mesin-mesin seperti kompresor dan turbin, di mana tekanan sistem dijaga konstan untuk mendukung berbagai operasi teknologi.

Dalam proses isobarik, pekerjaan yang dilakukan oleh atau pada sistem dapat terjadi karena ada perubahan volume. Misalnya, ketika gas diperluas, pekerjaan dilakukan oleh gas untuk mendorong dinding wadah yang fleksibel. Sebaliknya, ketika gas dikompresi, pekerjaan dilakukan pada gas oleh dinding wadah yang mendorong gas.

8.3.1 Persamaan matematik proses isobarik

Proses isobarik adalah proses yang terjadi pada tekanan konstan. Persamaan hukum termodinamika untuk proses isobarik tetap sama karena tekanannya tetap konstan dan karena adanya perubahan volume, sistem melakukan pekerjaan. Pekerjaan yang dilakukan dapat dihitung dengan persamaan berikut. Diagram PV dari proses isobarik ditunjukkan dalam Gambar 8.2.



Gambar 8.2 Grafik proses isobarik

Sumber : (Kamran & Fazal, 2021)

$$W = P \cdot \Delta V = P(V_2 - V_1)$$

Persamaan (1) dari hukum termodinamika pertama dapat diubah tulisannya menjadi Persamaan (6).

$$Q = \Delta U + P(V_2 - V_1) \quad (6)$$

8.3.2 Contoh kasus proses isobarik

Satu mol gas diatomik ideal, awalnya pada suhu 30°C dan tekanan konstan 2 bar, dibiarkan mengembang dari 5 hingga 10 m³ dengan memberikan panas pada suhu 50°C. Cari perubahan energi internal dari gas tersebut.

Penyelesaian:

$$Q = \Delta U + P(V_2 - V_1)$$

$$nC_p \Delta T = \Delta U + P(V_2 - V_1)$$

$$\Delta U = nC_p \Delta T - P(V_2 - V_1)$$

$$\Delta U = (2) \frac{(7)(8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})}{2} - (2 \text{ bar})(323 - 303 \text{ K})$$

$$\Delta U = 18.2 \text{ J}$$

8.4 Proses Isokhorik

Proses isokhorik, juga dikenal sebagai proses isovolumetrik, adalah jenis proses termodinamika di mana volume sistem tetap konstan selama perubahan yang terjadi. Dalam proses ini, sistem diisolasi sehingga tidak ada pekerjaan yang dilakukan oleh atau pada sistem, dan tidak ada perubahan volume sistem.

Karakteristik utama dari proses isokhorik adalah bahwa tidak ada pekerjaan yang dilakukan atau ada perubahan volume sistem, sehingga semua energi yang ditambahkan ke sistem dalam bentuk panas digunakan untuk meningkatkan energi internal sistem. Ini mengakibatkan peningkatan suhu sistem jika panas ditambahkan, atau penurunan suhu jika panas dihilangkan dari sistem.

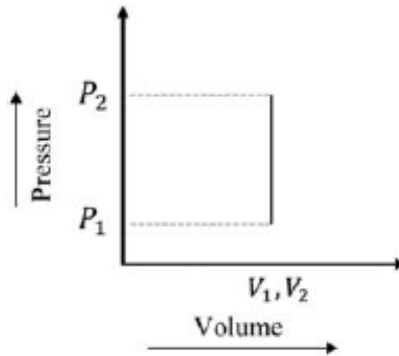
Proses isokhorik sering terjadi dalam sistem yang memiliki dinding yang sangat kaku sehingga tidak memungkinkan perubahan volume, atau dalam eksperimen laboratorium di mana volume tertentu perlu diamati atau dikendalikan.

Contohnya adalah ketika kita memanaskan zat dalam wadah kaku, seperti dalam sebuah beaker, dan volume beaker tidak berubah, maka proses pemanasan ini dapat dianggap sebagai proses isokhorik. Selama proses isokhorik, suhu zat akan meningkat karena seluruh panas yang ditambahkan digunakan untuk meningkatkan energi internal zat, tanpa ada pekerjaan yang dilakukan atau ada perubahan volume zat.

8.4.1 Persamaan matematik proses isokhorik

Proses isokhorik adalah proses yang terjadi pada volume konstan. Volume yang tetap berarti tidak ada pekerjaan yang dilakukan oleh sistem dan Persamaan (1) dapat ditulis sebagai Persamaan (6). Ini berarti seluruh energi panas yang diberikan ke sistem digunakan untuk meningkatkan energi internal sistem. Diagram PV dari proses isokhorik ditunjukkan dalam Gambar 8.3.

$$Q = \Delta U \quad (7)$$



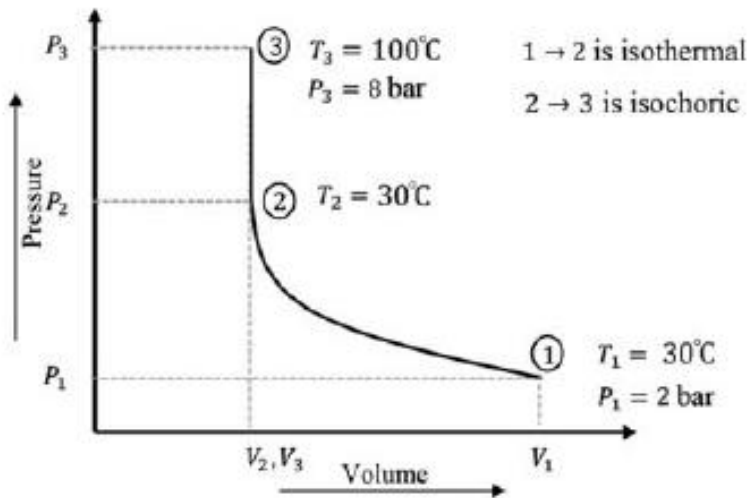
Gambar 8.3 Grafik proses isokhorik

Sumber : (Kamran & Fazal, 2021)

8.4.2 Contoh kasus proses isokhorik

Satu mol gas diatomik ideal, awalnya pada suhu 30°C dan 2 bar, dikompresi secara isoterma ke suatu titik sehingga saat dipanaskan secara isokhorik hingga suhu 100°C , tekanan akhirnya menjadi 8 bar.

1. Hitunglah W , Q , dan ΔU untuk proses isothermal.
2. Hitunglah W , Q , dan ΔU untuk proses isokhorik.



Gambar 8.4 Proses isothermal-isokhorik

Sumber : (Kamran & Fazal, 2021)

Penyelesaian: Seluruh proses terdiri dari proses isoterma ($1 \rightarrow 2$) dan proses isokhorik ($2 \rightarrow 3$). Kami menggambar grafik dari proses-proses yang diberikan dan memberi label pada parameter-parameter yang diminta, seperti V_1 , V_2 , V_3 , dan P_2 (Gambar 11.4).

Tekanan dan volume gas pada tiga tahap proses yang diberikan dapat ditemukan menggunakan persamaan gas umum ($PV = nRT$).

Untuk V_1

$$P_1 V_1 = nRT_1$$

$$V_1 = \frac{nRT_1}{P_1}$$

$$V_1 = \frac{(1)(R)(303)}{1}$$

$$V_1 = 303R$$

Untuk V_2 dan V_3

$$\begin{aligned}P_3 V_3 &= nRT_3 \\V_3 &= \frac{nRT_3}{P_3} \\V_3 &= \frac{(1)(R)(303)}{8} \\V_3 &= 37.9R = V_2\end{aligned}$$

Untuk P_2

$$\begin{aligned}P_2 V_2 &= nRT_2 \\P_2 &= \frac{nRT_2}{V_2} \\P_2 &= \frac{nRT_2}{V_2} \\P_2 &= \frac{(1)(R)(303)}{37.9R} = 7.99 \text{ bar}\end{aligned}$$

1. Kerja yang dilakukan pada proses isothermal ($1 \rightarrow 2$) dihitung dengan menggunakan Persamaan (5).

$$\begin{aligned}W &= nRT \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \\W &= (1)(R)(303) \cdot \ln\left(\frac{37.9R}{303R}\right) \\W &= -630R \text{ J}\end{aligned}$$

Karena prosesnya isothermal, tidak ada perubahan dalam energi internal yang terjadi, artinya $Q = W$.

$$Q = -630R \text{ J}$$

2. Kerja yang dilakukan dalam proses isokhorik (2→3) adalah nol karena tidak ada perubahan volume. Jumlah panas yang ditransfer sama dengan perubahan energi internal, yang dihitung dengan menggunakan Persamaan berikut. Kami menggunakan $C_p = 5R/2$ dan $C_v = 5R/2$ karena gas ini adalah gas diatomik.

$$Q = \Delta U = nC_v\Delta T$$

$$Q = \Delta U = (1)\left(\frac{5R}{2}\right)(373 - 303)$$

$$Q = \Delta U = 175R \text{ J}$$

8.5 Proses Adiabatik

Proses adiabatik adalah jenis proses termodinamika di mana suatu sistem mengalami perubahan tanpa ada pertukaran panas antara sistem dan lingkungannya. Dalam proses ini, sistem terisolasi termal sehingga tidak ada panas yang masuk atau keluar dari sistem.

Karena tidak ada pertukaran panas, energi internal sistem diubah melalui pekerjaan yang dilakukan oleh sistem sendiri. Ketika gas diompresi atau diekspansi adiabatik, energi internalnya berubah karena pekerjaan yang dilakukan oleh atau pada gas tersebut.

Dalam proses adiabatik, gas dapat menjadi lebih panas atau lebih dingin tergantung pada apakah itu dikompresi atau diekspansi. Ketika gas dikompresi adiabatik, tekanan dan suhu gas akan meningkat, sementara ketika gas diekspansi adiabatik, tekanan dan suhu gas akan menurun.

Salah satu contoh proses adiabatik adalah ketika kita meniup udara keluar dari mulut kita dengan cepat. Udara mengalami ekspansi adiabatik saat keluar dari mulut, menyebabkan tekanan dan suhu udara menurun. Proses adiabatik juga dapat ditemukan dalam mesin-mesin seperti kompresor dan turbin yang bekerja pada proses termodinamika tertentu.

Proses adiabatik merupakan konsep penting dalam termodinamika dan sering digunakan untuk memahami perubahan energi dalam sistem tertentu tanpa adanya pertukaran panas dengan lingkungan sekitarnya.

8.5.1 Persamaan matematik proses adiabatik

Proses di mana suatu sistem tidak bertukar panas dengan lingkungannya disebut proses adiabatik. Selama ekspansi adiabatik, sistem melakukan pekerjaan dengan mengorbankan energi internalnya. Karena tidak ada pertukaran panas, maka $Q=0$. Persamaan (1) dari hukum pertama termodinamika dapat ditulis sebagai Persamaan (8).

$$\begin{aligned}0 &= \Delta U + W \\ W &= -\Delta U\end{aligned}\tag{9}$$

Persamaan (8) menunjukkan bahwa tanpa ada pertukaran panas atau massa, sistem melakukan pekerjaan dengan menggunakan energi internalnya sendiri. Persamaan (8) dapat ditulis ulang sebagai Persamaan (10) dengan mengambil nilai W dari Persamaan (3) dan energi internal, dan kita dapat mengembangkan hubungan untuk kerja adiabatik.

$$P \cdot \Delta V = - n C_V \Delta T$$

$$dT = - \frac{P \cdot dV}{n C_V} \quad (9)$$

Dengan melakukan diferensiasi pada persamaan gas umum terhadap suhu dan menyubstitusi nilai dT dari Persamaan (9), kita mendapatkan hubungan berikut.

$$P \cdot dV + V \cdot dP = - \frac{R}{C_V} (P \cdot dV)$$

Dengan menyubstitusi nilai konstanta gas umum R dari Persamaan Mayer, dan membagi seluruh hubungannya dengan PV , kita mendapatkan hubungan berikut.

$$\frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = - \left(\frac{C_P}{C_V} - 1 \right) \frac{dV}{V}$$

Di mana $C_P/C_V = \gamma$ disebut rasio kapasitas kalor dan nilainya ditentukan untuk molekul gas monoatomik dan diatomik.

$$PV^\gamma = \text{Constant} \quad (10)$$

Persamaan (10) adalah fakta yang sudah teruji; selama ekspansi adiabatik, hasil kali tekanan dan V^γ tetap konstan.

8.5.2 Contoh kasus proses adiabatik

Contoh 1:

Sebuah gas ideal diatomik tertentu mengalami ekspansi secara adiabatik; awalnya, 2 mol gas berada pada tekanan 101.300 Pa, volume 5 m³, dan suhu 25°C. Volume akhir

meningkat menjadi 10 m^3 . Hitunglah tekanan akhir dari gas tersebut.

Diberikan data

$$n = 2 \text{ mol}$$

$$P_1 = 101,300 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$V_1 = 5 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 10 \text{ m}^3$$

$$T_1 = 25^\circ\text{C}$$

Solusi

Sebagai gas mengalami ekspansi adiabatik, Persamaan (10) menunjukkan bahwa hasil kali PV^γ tetap konstan pada setiap saat selama reaksi, yaitu,

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma$$

di mana $\gamma = CP/CV$ adalah rasio kapasitas panas dan dihitung untuk gas diatomik menggunakan persamaan:

$$\gamma = \frac{7R/2}{5R/2} = \frac{7}{5}$$

$$P_2 = 101,300 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \left(\frac{5 \text{ m}^3}{10 \text{ m}^3} \right)^{7/5}$$

$$P_2 = 38385.5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Contoh 2:

Sebuah tabung gas berisi 2 mol O_2 pada suhu $125^\circ C$ dan tekanan 2.0 atm. Gas tersebut mengalami ekspansi secara adiabatik hingga tekanannya menjadi 6.0 atm. Berapakah volume akhir dan suhunya?

Diberikan data:

$$n = 2 \text{ mol}$$

$$P_1 = 3 \text{ atm}$$

$$P_2 = 6 \text{ atm}$$

$$T_1 = 125^\circ C$$

$$V_1 = ?$$

$$V_2 = ?$$

$$T_2 = ?$$

Solusi

Kita menemukan volume awal dari gas diatomik dengan menggunakan persamaan gas umum.

$$P_1 V_1 = nRT_1$$

$$V_1 = \frac{nRT_1}{P_1}$$

$$V_1 = \frac{(2)(8.31)(398)}{3(101,300)}$$

$$V_1 = 0.022 \text{ m}^3$$

Karena gas mengalami ekspansi secara adiabatik, Persamaan (10) menunjukkan bahwa hasil kali PV^γ tetap konstan pada setiap saat selama reaksi, yaitu

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

$$3(0.022)^{7/5} = 6(V_2)^{7/5}$$

$$V_2 = 0.0134 \text{ m}^3$$

Suhu akhir dari gas dapat dihitung berdasarkan fakta bahwa persamaan gas umum tetap konstan pada setiap saat proses, yaitu

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

$$T_2 = \frac{P_2 V_2 T_1}{P_1 V_1}$$

$$T_2 = \frac{(6 \text{ atm})(0.0134 \text{ m}^3)(398 \text{ K})}{(3 \text{ atm})(0.022 \text{ m}^3)}$$

$$T_2 = 485 \text{ K}$$

8.6 Aplikasi Hukum Termodinamika 1

Hukum termodinamika pertama memiliki banyak aplikasi dalam kehidupan sehari-hari. Berikut adalah beberapa contoh penerapannya:

1. Mesin Termal: Hukum termodinamika pertama merupakan dasar bagi mesin termal, seperti mesin uap, mesin pembakaran dalam, dan mesin lainnya. Hukum ini menjelaskan konversi energi panas menjadi energi mekanik, yang digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk transportasi dan pembangkit listrik.
2. Kulkas dan Pendingin: Prinsip kerja kulkas dan pendingin juga didasarkan pada hukum termodinamika pertama. Sistem pendingin ini

menggunakan perubahan tekanan dan volume gas untuk menghilangkan panas dari suatu ruang dan mendinginkannya.

3. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi: Di beberapa wilayah yang memiliki sumber panas bumi, hukum termodinamika pertama digunakan dalam pembangkit listrik tenaga panas bumi, di mana panas bumi digunakan untuk menghasilkan uap yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin listrik.
4. Sistem Pemanas Rumah: Ketika memanaskan rumah, hukum termodinamika pertama digunakan untuk menghitung jumlah energi panas yang diperlukan untuk mencapai suhu yang diinginkan dalam ruangan.
5. Kegunaan dalam Industri: Di industri, hukum termodinamika pertama digunakan untuk merencanakan dan mengoptimalkan sistem pemanasan, pendinginan, dan pembangkitan tenaga.
6. Proses Kimia: Hukum termodinamika pertama digunakan dalam berbagai reaksi kimia, termasuk dalam pengembangan proses kimia dan perhitungan energi yang terlibat dalam reaksi.
7. Pengembangan Energi Terbarukan: Dalam bidang energi terbarukan, seperti sel surya dan turbin angin, hukum termodinamika pertama membantu dalam pemahaman dan pengoptimalan proses konversi energi.

DAFTAR PUSTAKA

Kamran, M., & Fazal, M. R. (2021). Renewable Energy Conversion Systems. In *Elsevier*.

BAB 9

ENTROPI

Oleh Neny Rochyani

9.1 Pendahuluan

Termodinamika merupakan cabang ilmu yang mempelajari perubahan energi dalam sistem fisik dan interaksinya dengan lingkungannya. Pemahaman tentang entropi muncul melalui perkembangan ilmu termodinamika pada abad ke-19. Seiring dengan penelitian dan eksperimen dalam termodinamika, ilmuwan mulai menyadari bahwa terdapat suatu konsep yang berkaitan dengan ketidakteraturan dan perubahan dalam sistem yang mereka sebut sebagai entropi. Pada awalnya, konsep entropi ditemukan dalam konteks perubahan panas menjadi kerja dalam mesin-mesin uap. Tahun 1824, seorang insinyur Prancis bernama Sadi Carnot menyelidiki efisiensi mesin uap dan merumuskan prinsip kerjanya yang kemudian dikenal sebagai siklus Carnot. Dalam penelitiannya, Carnot menyadari bahwa ada suatu ukuran yang berkaitan dengan ketidakteraturan atau disebut "*déperdition*" dalam sistem mesin uap tersebut. Konsep ini kemudian dikembangkan lebih lanjut oleh para ilmuwan termodinamika seperti Rudolf Clausius dan Lord Kelvin.

Pada tahun 1850-an, Clausius mengenalkan istilah "entropi" untuk menggambarkan ukuran ketidakteraturan atau dispersi energi dalam sistem termodinamika. Ia

mendefinisikan entropi sebagai besaran yang berhubungan dengan panas yang dialirkan dalam sistem, serta mengamati bahwa entropi cenderung meningkat atau tidak berkurang dalam proses alami. Di tahun 1870-an, Lord Kelvin menyempurnakan konsep entropi dengan menyatakan bahwa entropi juga berkaitan dengan perubahan suhu dalam sistem termodinamika. Sejak itu, entropi menjadi salah satu konsep kunci dalam termodinamika dan digunakan untuk menjelaskan berbagai fenomena fisik, termasuk perubahan energi, keseimbangan termodinamika, dan keirreversibilitasan proses alami. Konsep entropi juga diterapkan dalam berbagai bidang ilmu, termasuk fisika statistik, kimia, biologi, dan ilmu komputer. (Callen, H. B. 1985).

Penelitian terkini tentang entropi terus berlanjut, termasuk pengembangan teori entropi dalam konteks fisika kuantum dan termodinamika non-ekivalen. Pemahaman yang lebih mendalam tentang entropi dan perannya dalam sistem alami memberikan wawasan yang penting bagi ilmuwan dan insinyur dalam mengoptimalkan proses, merancang mesin yang lebih efisien, serta memahami aspek fundamental dari alam semesta kita. (Schroeder, D. V. 2000)

9.2 Entropi dan Hukum Termodinamika II

Hubungan antara Entropi dan Hukum Termodinamika II ini bertujuan untuk memberikan pemahaman dasar tentang konsep entropi, yang merupakan salah satu konsep paling fundamental dalam termodinamika. Entropi merupakan ukuran ketidakteraturan atau dispersi energi dalam suatu sistem. Konsep ini telah memainkan peran penting dalam pemahaman kita tentang bagaimana energi berubah bentuk dan berinteraksi dalam berbagai

sistem fisik, termasuk proses alami dan mesin. (Kittel, C., & Kroemer, H. 1980) (Kondepudi, D., & Prigogine, I. 1998)

Dalam termodinamika, kita mempelajari bagaimana energi diperlakukan dan berpindah antara sistem dan lingkungannya. Konsep entropi muncul sebagai cara untuk memahami arah perubahan energi dalam sistem dan menggambarkan properti dasar dari sistem tersebut. Entropi menghubungkan konsep termodinamika seperti panas, kerja, dan suhu dengan ketidakaturan sistem. Penting untuk dicatat bahwa entropi memiliki keterkaitan erat dengan hukum kedua termodinamika. Hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa entropi suatu sistem terisolasi cenderung meningkat atau setidaknya tidak berkurang dalam proses alami. Dengan kata lain, sistem biasanya menuju keadaan yang lebih acak atau tidak teratur seiring berjalannya waktu. Namun, entropi tidak hanya berkaitan dengan ketidakaturan mikroskopik dalam sistem. Konsep ini juga memiliki implikasi penting dalam pemahaman tentang kehidupan dan evolusi.

Penjelasan berikut, kita akan menjelajahi konsep dasar entropi, hubungannya dengan panas, kerja, dan suhu, serta aplikasinya dalam berbagai bidang ilmu. Dengan memahami konsep entropi, kita dapat memiliki wawasan yang lebih mendalam tentang perubahan energi, hukum termodinamika, dan prinsip-prinsip dasar yang mengatur alam semesta kita. Termodinamika adalah cabang ilmu fisika yang mempelajari perubahan energi dalam sistem fisik serta interaksinya dengan lingkungannya. Istilah "termodinamika" berasal dari bahasa Yunani "thermos" yang berarti panas, dan "dynamis" yang berarti kekuatan atau gerakan. Konsep termodinamika berpusat pada pemahaman tentang

bagaimana energi berubah bentuk dan berpindah antara sistem dan lingkungan. (Atkins, P., & de Paula, J. 2010)

Termodinamika didasarkan pada dua hukum termodinamika yang mendasar. Hukum pertama termodinamika, juga dikenal sebagai Prinsip Konservasi Energi, menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, namun hanya dapat berubah bentuk dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Hukum ini menyatakan bahwa total energi dalam suatu sistem terisolasi tetap konstan.

Hukum kedua termodinamika berkaitan dengan konsep entropi, yang menggambarkan tingkat ketidakteraturan atau dispersi energi dalam sistem. Hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa dalam proses alami, entropi suatu sistem terisolasi cenderung meningkat atau setidaknya tidak berkurang. Dalam kata lain, sistem cenderung menuju keadaan yang lebih acak atau tidak teratur seiring berjalannya waktu. Hukum ini memberikan arah perubahan energi dalam sistem dan menjelaskan mengapa beberapa proses termodinamika tidak dapat dibalik secara sempurna. (McQuarrie, D. A., & Simon, J. D. 2000)

Termodinamika juga menggambarkan hubungan antara panas, kerja, dan suhu. Panas adalah bentuk energi yang ditransfer antara dua objek yang memiliki perbedaan suhu. Kerja adalah transfer energi yang terjadi karena perpindahan atau perubahan keadaan fisik suatu sistem. Suhu, diukur dalam satuan kelvin, menggambarkan tingkat kepanasan atau kebekuan suatu objek dalam kaitannya dengan perubahan energi dalam sistem. Termodinamika memiliki berbagai aplikasi dalam kehidupan sehari-hari dan dalam berbagai bidang ilmu. Misalnya, dalam bidang teknik mesin, termodinamika digunakan untuk merancang dan

meningkatkan efisiensi mesin dan sistem energi. Pada bidang kimia, termodinamika digunakan untuk memahami reaksi kimia, kesetimbangan kimia, dan sifat materi. Di bidang biologi, termodinamika digunakan untuk memahami metabolisme dan kinerja organisme hidup.

Dengan memahami prinsip-prinsip termodinamika, kita dapat mengoptimalkan penggunaan energi, merancang sistem yang lebih efisien, dan memahami bagaimana energi berubah bentuk dalam berbagai proses alami. Termodinamika menjadi dasar bagi banyak prinsip dan aplikasi dalam ilmu fisika dan ilmu lainnya, serta memberikan pemahaman yang mendalam tentang bagaimana alam semesta kita bekerja.

Entropi adalah konsep penting dalam termodinamika yang menggambarkan tingkat ketidakteraturan atau dispersi energi dalam suatu sistem. Entropi sering dikaitkan dengan konsep ketertiban atau kekacauan dalam sistem tersebut. Semakin tinggi entropi, semakin besar ketidakteraturan atau kekacauan dalam sistem, sedangkan entropi rendah menunjukkan tingkat ketertiban yang tinggi.

Entropi dapat didefinisikan sebagai ukuran mikroskopik dari jumlah keadaan atau konfigurasi partikel-partikel dalam sistem. Pada sistem terisolasi yang tidak menerima atau melepaskan energi atau partikel, entropi cenderung meningkat seiring berjalannya waktu. Ini sesuai dengan hukum kedua termodinamika yang menyatakan bahwa dalam proses alami, entropi sistem terisolasi tidak akan berkurang. Dengan kata lain, sistem terisolasi cenderung menuju keadaan yang lebih acak atau tidak teratur.

Perubahan entropi dalam suatu sistem dapat dijelaskan melalui transfer energi dalam bentuk panas. Ketika panas ditransfer ke dalam sistem, partikel-partikel dalam sistem menjadi lebih bergerak secara acak, menyebabkan peningkatan entropi. Sebaliknya, jika panas dikeluarkan dari sistem, partikel-partikel cenderung memiliki keadaan yang lebih teratur, yang menyebabkan penurunan entropi.

Penting untuk dicatat bahwa entropi tidak hanya berlaku untuk sistem fisik makroskopik, tetapi juga berlaku untuk sistem mikroskopik seperti partikel-partikel dalam sistem kuantum. Dalam fisika statistik, entropi didefinisikan sebagai ukuran ketidakteraturan partikel-partikel dalam sistem kuantum. Pemahaman tentang entropi memberikan wawasan penting dalam berbagai bidang ilmu. Dalam termodinamika, entropi digunakan untuk menjelaskan arah perubahan energi dalam sistem dan memprediksi keseimbangan termodinamika. (McQuarrie, D. A., & Simon, J. D. 2000) (Pathria, R. K., & Beale, P. D. 2011).

Dengan menggunakan konsep entropi, kita dapat memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang perubahan energi, hukum kedua termodinamika, dan prinsip dasar yang mengatur tingkah laku sistem fisik. Entropi juga memberikan pengetahuan yang lebih dalam tentang aspek fundamental dari alam semesta kita, termasuk pemeliharaan ketertiban, evolusi, dan keterkaitan antara energi dan ketidakteraturan.

9.3 Perubahan Entropi

Perubahan entropi mengacu pada perubahan tingkat ketidakteraturan atau dispersi energi dalam suatu sistem termodinamika. Entropi dapat meningkat, berkurang, atau tetap konstan tergantung pada jenis proses atau perubahan yang terjadi dalam sistem tersebut.

1. Perubahan Entropi dalam Sistem Terisolasi:

Dalam sistem terisolasi, yang tidak berinteraksi dengan lingkungan eksternal, perubahan entropi terjadi karena pertukaran panas dalam system. Jika panas ditransfer ke dalam sistem, partikel-partikel dalam sistem akan memiliki lebih banyak kebebasan untuk bergerak secara acak, sehingga meningkatkan entropi sistem. Sebaliknya, jika panas dikeluarkan dari sistem, partikel-partikel cenderung memiliki keadaan yang lebih teratur, yang menyebabkan penurunan entropi.

2. Perubahan Entropi dalam Proses Termodinamika:

Dalam proses termodinamika, entropi dapat berubah tergantung pada jenis proses yang terjadi. Beberapa contoh penting adalah: (Greiner, W., & Neise, L. 1995)

- Proses Reversibel: Dalam proses reversibel yang ideal, entropi sistem tetap konstan karena sistem kembali ke keadaan awalnya setelah proses selesai. Meskipun tidak ada peningkatan entropi, proses ini jarang terjadi di alam nyata.
- Proses Irreversibel: Pada proses irreversibel, entropi sistem meningkat. Contohnya adalah proses panas yang mengalir dari objek dengan suhu tinggi ke objek dengan

suhu rendah. Entropi sistem meningkat karena terjadi peningkatan dispersi energi dalam system.

- Proses Isentropik: Entropi sistem tetap konstan pada proses yang terjadi juga dalam proses adiabatik dimana tidak melibatkan pertukaran panas antara sistem dan lingkungannya.

3. Perubahan Entropi dalam Sistem Terbuka:

Pada sistem terbuka, yang berinteraksi dengan lingkungan eksternal, entropi dapat berubah akibat pertukaran panas dan materi dengan lingkungan. Jika panas atau materi masuk ke dalam sistem, entropi sistem cenderung meningkat karena adanya penambahan energi atau partikel. Sebaliknya, jika panas atau materi keluar dari sistem, entropi sistem cenderung berkurang karena kehilangan energi atau partikel.

Perubahan entropi dalam suatu sistem sangat terkait dengan hukum kedua termodinamika. Hukum Termodinamika kedua menyatakan bahwa dalam proses alami, entropi sistem terisolasi cenderung meningkat atau setidaknya tidak berkurang. Atau dengan kata lain, sistem cenderung menuju keadaan yang lebih acak atau tidak teratur seiring berjalannya waktu. Pemahaman tentang perubahan entropi memainkan peran penting dalam pemodelan dan analisis sistem termodinamika, serta dalam merancang dan mengoptimalkan proses dan mesin. Perubahan entropi juga memiliki implikasi penting dalam bidang ilmu lainnya, seperti fisika statistik, kimia, biologi, dan ilmu komputer.

9.4 Entropi dalam Ilmu Kimia

Entropi memiliki peran penting dalam ilmu kimia dan digunakan untuk memahami berbagai aspek reaksi kimia, kesetimbangan kimia, dan sifat materi. Entropi dalam ilmu kimia menentukan :

1. Prediksi Arah Reaksi Kimia

Dalam hal ini perubahan entropi sistem dapat memberikan petunjuk tentang apakah reaksi tersebut cenderung menuju ke arah yang lebih terurut atau lebih tidak terurut. Jika perubahan entropi total (sistem + lingkungan) positif, reaksi tersebut cenderung bergerak ke arah yang lebih tidak terurut, meningkatkan entropi total. Sebaliknya, jika perubahan entropi total negatif, reaksi cenderung bergerak ke arah yang lebih terurut.

2. Kesetimbangan Kimia

Konsep entropi juga digunakan untuk memahami kesetimbangan kimia. Ketika sistem mencapai kesetimbangan, entropi total mencapai maksimum. Dalam persamaan kesetimbangan kimia, perubahan entropi digunakan untuk menghitung kontribusi entropi sistem terhadap entropi total. Pemahaman tentang perubahan entropi ini membantu dalam memahami faktor-faktor yang mempengaruhi kesetimbangan kimia dan arah pergeseran kesetimbangan saat kondisi berubah.

3. Sifat Termal dan Fase Materi

Entropi terkait erat dengan sifat termal dan fase materi. Pada suhu konstan, perubahan entropi memberikan petunjuk tentang apakah perubahan tersebut akan menghasilkan perubahan fase. Misalnya, jika perubahan entropi positif, maka materi cenderung

mengalami perubahan fase dari padat ke cair atau dari cair ke gas.

4. Diagram Fase

Dalam pembuatan diagram fase, entropi digunakan sebagai parameter penting. Diagram fase menggambarkan hubungan antara suhu, tekanan, dan fase materi. Perubahan entropi pada setiap fase membantu dalam memahami perubahan struktur dan ketidakteraturan yang terjadi saat fase berubah.

5. Keseimbangan Termodinamika dalam Reaksi Kimia

Konsep entropi digunakan untuk memahami keseimbangan termodinamika dalam reaksi kimia. Pada suhu dan tekanan tertentu, keadaan keseimbangan tercapai ketika perubahan entropi total sistem dan lingkungan sama dengan nol. Pemahaman tentang perubahan entropi membantu dalam memprediksi kondisi keseimbangan dan memahami bagaimana faktor-faktor seperti suhu dan tekanan mempengaruhi keseimbangan kimia.

Dalam ilmu kimia, entropi menjadi alat penting untuk menganalisis dan memahami sistem kimia. Pemahaman tentang entropi membantu ilmuwan kimia dalam memprediksi arah reaksi, memahami kesetimbangan kimia, menganalisis sifat termal dan fase materi, serta merancang dan mengoptimalkan proses kimia.

Contoh Penerapan Entropi

Entropi dan konsep termodinamika secara umum memiliki berbagai penerapan dalam kehidupan sehari-hari. Berikut adalah beberapa contoh:

1. Pendinginan minuman ; Ketika Anda meletakkan minuman panas di dalam ruangan yang lebih dingin, entropi sistem meningkat. Panas dari minuman mengalir ke lingkungan sekitar yang lebih dingin, dan suhu minuman merata dengan suhu sekitarnya. Proses ini mengikuti hukum kedua termodinamika, di mana entropi meningkat karena terjadi perubahan suhu dan penyebaran energi panas.
2. Penguraian makanan ; Ketika makanan mengalami proses penguraian atau pembusukan, entropi meningkat. Proses ini melibatkan penguraian molekul-molekul kompleks dalam makanan menjadi molekul yang lebih sederhana dan lebih teracak secara mikroskopik, sehingga meningkatkan entropi.
3. Proses pencampuran ; Saat Anda mencampur dua cairan atau gas yang berbeda, entropi sistem meningkat. Partikel-partikel di dalam campuran memiliki lebih banyak cara untuk teratur secara mikroskopik, meningkatkan jumlah keadaan mikroskopik yang mungkin, dan dengan demikian, meningkatkan entropi sistem.
4. Pembakaran bahan bakar ; Ketika bahan bakar, seperti kayu atau bensin, terbakar, entropi meningkat. Proses pembakaran ini melibatkan pelepasan panas ke lingkungan sekitar, yang menyebabkan penyebaran energi termal dan meningkatkan entropi. Peningkatan entropi juga terkait dengan penguraian molekul bahan bakar menjadi produk yang lebih sederhana.
5. Pelapukan dan korosi ; Proses pelapukan dan korosi benda-benda logam atau material lainnya juga terkait dengan peningkatan entropi. Ketika material terpapar

dengan lingkungan dan mengalami reaksi kimia atau penguraian, terjadi perubahan struktur yang menyebabkan peningkatan entropi.

Penerapan entropi dalam kehidupan sehari-hari ini hanya beberapa contoh, tetapi entropi dapat ditemukan dalam berbagai proses dan fenomena alam yang melibatkan perubahan energi, suhu, atau ketidakaturan.

9.5 Perhitungan Entropi

Entropi (S) merupakan suatu unit untuk mengukur keacakan atau ketidak beraturan dari suatu sistem. Unit ini dikenalkan oleh Clausius, perubahan entropy pada suatu reversibel sistem dinyatakan sebagai perubahan kalor tiap waktu.

$$S = \frac{Q}{T}$$

Ada beberapa cara dalam menghitung entropi dari perubahan entropi dalam suatu sistem termodinamika.

1. Entropi Proses Reversible

Untuk suatu proses yang dapat balik atau disebut dengan reversibel, kita dapat mengasumsikan besaran entropi dari sistem tersebut. Dengan probabilitas yang sama, entropi sama dengan konstanta Boltzmann ($1,38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) dikalikan dengan logaritma natural dari jumlah kemungkinan state yang terbentuk.

$$S = k_B \times \ln W$$

Atau dapat dihitung juga dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\Delta S = \int \left(\frac{dq}{T} \right)$$

Keterangan :

ΔS = Perubahan entropi sistem,

$\int$ = Tanda integral menunjukkan integral dari suatu fungsi,

dQ = Perubahan panas infinitesimal yang diterima atau dilepaskan oleh system,

T = Suhu pada setiap titik dalam proses.

Perlu dicatat bahwa perhitungan entropi dalam proses reversibel hanya berlaku dalam konteks ideal di mana proses terjadi secara lambat dan sistem berada dalam keadaan keseimbangan pada setiap langkahnya. Dalam praktiknya, proses reversibel sering digunakan sebagai acuan untuk membandingkan perubahan entropi dengan proses yang lebih nyata yang mungkin menghasilkan kerugian energi atau ketidakteraturan tambahan.

2. Entropi dari Isotermal

Dasar dari perhitungan entropi dari isothermal adalah persamaan yang dikenalkan oleh Clausius. Cara ini dilakukan dengan menghitung perubahan entropi (S) menggunakan perubahan panas yang terjadi (Q) dan juga adanya temperatur absolut (T).

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Keterangan :

ΔS = Perubahan Entropi (kcal/K)

ΔQ = Perubahan Panas (kcal)

T = Temperatur (K)

Pada setiap perubahan temperatur dari suhu panas ke suhu dingin maka akan terjadi peningkatan nilai entropi. Hal ini dapat diartikan bahwa dengan diketahuinya temperatur maka perubahan entropi bisa dihitung. Air pada 0°C dianggap memiliki entropi sebesar nol, dimana secara teoritis entropi suatu zat bernilai nol pada temperatur nol absolut. Sehingga pada perhitungan entropi, referensi dasar yang sederhana harus dipilih untuk penyelesaian perhitungan.

3. Entropi dan Energi Dalam

Dalam kimia fisik dan termodinamika, salah satu persamaan yang paling berguna dan berkaitan dengan entropi adalah energi dalam (U) yang menyertai suatu sistem termodinamika. Perubahan energi dalam (dU) sama dengan suhu absolut dikalikan dengan perubahan entropi yang dikurangi dengan tekanan eksternal (P) dan juga perubahan volume (V).

$$dU = T dS - P dV$$

Contoh Soal :

1. Hitunglah nilai perubahan entropi untuk proses penguapan air, jika diketahui sebanyak 1 mol air (H₂O) memiliki suhu 98°C dengan kalor 47,3 J/mol.

Jawab :

Suhu air 98°C = 371K

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

$$\Delta S = \frac{47,3}{371}$$

$$\Delta S = 0,127 \text{ J/Kmol}$$

2. Hitung perubahan entropi yang terjadi pada proses berikut, bila 8 gram gas oksigen mengalami ekspansi dengan suhu 50°C pada volume 1,5 L hingga 3 L. Dari data tersebut, Jawab :

$$W = -nRT \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$W = \frac{-8}{32} \times 8,314 \times 323 \times \ln \frac{3}{1,5}$$

$$W = -496,37 \text{ J} \text{ dimana } -W = Q$$

Perubahan entropi :

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

$$\Delta S = \frac{-496,37}{323}$$

$$\Delta S = -1,5 \text{ J/K}$$

Kesimpulan

Entropi adalah konsep yang sangat penting dalam termodinamika dan ilmu fisika secara umum. Berikut adalah beberapa kesimpulan utama yang dapat diambil mengenai entropi:

1. Ketidakteraturan dan Ketertiban:

Entropi menggambarkan tingkat ketidakteraturan atau kekacauan dalam suatu sistem. Semakin tinggi entropi, semakin besar ketidakteraturan dalam sistem, sementara entropi

rendah menunjukkan tingkat ketertiban yang tinggi. Konsep ini memberikan wawasan tentang bagaimana energi tersebar dan bagaimana sistem cenderung menuju keadaan yang lebih acak.

2. Hukum Kedua Termodinamika:

Entropi memiliki kaitan erat dengan hukum kedua termodinamika. Hukum ini menyatakan bahwa entropi dalam sistem terisolasi cenderung meningkat atau setidaknya tidak berkurang dalam proses alami. Dalam kata lain, sistem cenderung menuju keadaan yang lebih acak atau tidak teratur seiring berjalannya waktu. Entropi berperan dalam memahami arah perubahan energi dalam sistem.

3. Perubahan Entropi:

Perubahan entropi terjadi dalam sistem termodinamika karena pertukaran panas, materi, atau energi dengan lingkungan. Peningkatan entropi terjadi ketika energi atau partikel masuk ke dalam sistem, sementara penurunan entropi terjadi ketika energi atau partikel keluar dari sistem. Perubahan entropi memberikan petunjuk tentang perubahan ketidakteraturan sistem.

4. Entropi dalam Ilmu Kimia

Konsep entropi memiliki keterkaitan yang luas dalam berbagai bidang ilmu, termasuk fisika, kimia, biologi, dan ilmu komputer. Dalam ilmu kimia, entropi digunakan untuk memprediksi arah reaksi kimia dan memahami kesetimbangan kimia.

5. Wilayah Pemahaman Konsep Entropi

Pemahaman tentang entropi memberikan wawasan yang lebih dalam tentang bagaimana energi berubah bentuk dan berinteraksi dalam sistem fisik. Entropi juga berkontribusi pada pemahaman kita tentang prinsip-prinsip dasar yang mengatur alam semesta, termasuk hukum termodinamika, kesetimbangan, evolusi, dan hubungan antara energi dan ketidakteraturan.

Dengan memahami konsep entropi, kita dapat menggali lebih dalam tentang perubahan energi, keseimbangan termodinamika, serta fenomena fisik dan kimia di sekitar kita. Entropi menjadi alat penting dalam analisis dan pemodelan sistem fisik, serta membantu kita dalam merancang dan mengoptimalkan proses-proses di berbagai bidang ilmu.

DAFTAR PUSTAKA

- Callen, H. B. (1985). *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. John Wiley & Sons.
- Schroeder, D. V. (2000). *An Introduction to Thermal Physics*. Addison-Wesley.
- Kittel, C., & Kroemer, H. (1980). *Thermal Physics*. W. H. Freeman and Company.
- Kondepudi, D., & Prigogine, I. (1998). *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures*. John Wiley & Sons.
- Huang, K. (1987). *Statistical Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Atkins, P., & de Paula, J. (2010). *Atkins' Physical Chemistry*. Oxford University Press.
- McQuarrie, D. A., & Simon, J. D. (2000). *Physical Chemistry: A Molecular Approach*. University Science Books.
- Pathria, R. K., & Beale, P. D. (2011). *Statistical Mechanics*. Elsevier
- Hill, T. L. (1986). *An Introduction to Statistical Thermodynamics*. Dover Publications.
- Greiner, W., & Neise, L. (1995). *Thermodynamics and Statistical Mechanics*. Springer

BAB 10

PROSES CARNOT

Oleh Alvin Dior Al Ghifari

10.1 Pendahuluan

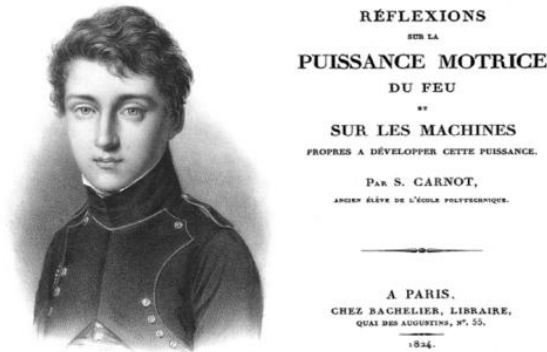
Semua orang menyadari bahwa panas dapat menyebabkan gerakan. Tidak ada yang bisa menyangkal bahwa panas memiliki daya penggerak yang sangat besar, khususnya pada zaman ketika mesin uap sudah ditemukan. Pergerakan besar yang terjadi di bumi juga disebabkan oleh panas, seperti pergerakan atmosfer, pembentukan awan, turunnya hujan, jatuhnya meteorit, serta air yang mengalir di permukaan bumi. Selain itu, panas juga berperan dalam terjadinya gempa bumi dan letusan gunung berapi (Carnot, 1890).

Sumber energi yang sangat besar telah tersedia di alam. Manusia dapat memanfaatkan energi ini untuk berbagai keperluan. Salah satu jenis energi ini adalah berupa bahan-bahan yang mudah terbakar. Bahan-bahan ini memiliki kemampuan untuk menghasilkan panas dan dapat dimanfaatkan oleh mesin panas untuk menggerakkan berbagai jenis mesin dan peralatan (Carnot, 1890).

Mesin panas memainkan peran kunci dalam memanfaatkan energi dari bahan yang mudah terbakar. Prinsip kerja mesin panas melibatkan panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar untuk mengubahnya menjadi gerakan mekanis. Melalui prinsip kerja tertentu, seperti

proses atau siklus Carnot, energi panas dapat diubah menjadi energi kinetik yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi (Ling *et al.*, 2018). Proses Carnot inilah yang akan menjadi pokok bahasan bab ini.

Siklus Carnot adalah siklus termodinamika yang pertama kali diperkenalkan oleh insinyur Prancis bernama Sadi Carnot pada tahun 1824. Karya Carnot tentang siklus ini meletakkan dasar bagi pengembangan termodinamika klasik. Kalor dan hubungannya dengan usaha, baru mulai dipahami pada saat Carnot menyusun siklus tersebut. Selama Revolusi Industri, mesin uap khususnya menjadi semakin penting, oleh karena itu Carnot mulai menyelidiki keefektifannya (Laranjeiras dan Portela, 2016).



Gambar 10.1 Sadi Carnot (kiri) dan karyanya (kanan) yang menjelaskan tentang mesin panas dan siklusnya.
(Sumber: Laranjeiras dan Portela, 2016).

Carnot dapat menentukan efisiensi tertinggi untuk mesin panas yang bekerja di antara dua reservoir suhu karena analisis teoritisnya tentang siklus Carnot. Dia menunjukkan bahwa perbedaan suhu antara reservoir panas

dan dingin adalah satu-satunya faktor yang mempengaruhi efisiensi mesin (Ling *et al.*, 2018).

Pentingnya karya Carnot tentang siklus Carnot dapat dikaitkan dengan pemahaman mendasar yang diberikannya tentang sifat panas dan bagaimana panas dapat diubah menjadi kerja. Ia memperkenalkan ide efisiensi Carnot, yang merupakan efisiensi potensial maksimum untuk mesin panas. Selain itu, ini membuka jalan bagi perluasan bidang termodinamika secara keseluruhan, yang memiliki konsekuensi signifikan untuk sejumlah spesialisasi bidang sains dan teknik (Shang *et al.*, 2014).

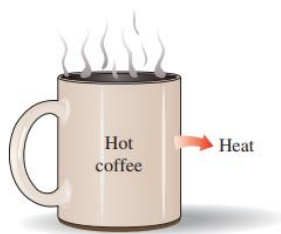
Meskipun Carnot sendiri tidak memiliki peralatan yang cukup untuk menguji siklusnya secara eksperimental pada masanya, kontribusinya dalam bidang termodinamika memiliki dampak yang signifikan. Hingga saat ini, pemahaman dan peningkatan kinerja mesin panas serta sistem termodinamika lainnya masih bergantung pada penelitian yang melibatkan siklus dan teorema Carnot. Penelitian lebih lanjut terkait dengan siklus Carnot dan penerapannya tetap relevan dalam upaya meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sumber daya energi (Shang *et al.*, 2014).

10.2 Hukum Kedua Termodinamika

Ketika membahas tentang energi dan perilakunya, terdapat aturan yang disebut hukum pertama termodinamika. Hukum ini menjelaskan bahwa energi selalu terjaga, yang berarti energi tidak hilang dan muncul begitu saja. Pada bab-bab sebelumnya, telah dibahas berbagai proses yang melibatkan sistem tertutup dan terbuka serta penerapan hukum ini untuk memahami bagaimana energi

berfungsi. Energi adalah sesuatu yang tetap, dan tidak ada proses yang melanggar hukum ini. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa setiap proses yang terjadi harus mematuhi hukum pertama termodinamika. Namun, hal yang perlu diperhatikan adalah bahwa hanya karena suatu proses memenuhi hukum pertama termodinamika, tidak berarti proses tersebut akan benar-benar terjadi. Ada faktor dan kondisi lain yang berperan penting. Jadi, meskipun hukum pertama termodinamika penting, hal itu bukan satu-satunya faktor yang menentukan terjadinya suatu proses (Çengel dan Boles, 2019).

Sebagai ilustrasi, ketika kita biarkan secangkir kopi panas di ruangan yang lebih dingin, kopi tersebut akan menjadi lebih dingin seiring waktu berlalu. Hal ini sesuai dengan hukum pertama termodinamika, karena kopi tersebut melepas energi yang kemudian diterima oleh udara sekitar. Sekarang, bayangkan jika kebalikannya terjadi: kopi panas menjadi lebih panas di ruangan yang lebih dingin karena perpindahan panas dari udara. Meskipun kita tahu hal ini tidak mungkin terjadi, namun hal tersebut tidak melanggar hukum pertama termodinamika selama udara melepas energi yang sama dengan energi yang diterima oleh kopi (Çengel dan Boles, 2019).



Gambar 10.2 Panas berpindah dari secangkir kopi panas ke ruangan yang dingin.

(Sumber: Çengel dan Boles, 2019)

Berdasarkan contoh tersebut, menjadi jelas bahwa proses perpindahan panas memiliki arah tertentu dan tidak terjadi secara terbalik. Hukum pertama termodinamika tidak menentukan arah suatu proses perpindahan panas, dan memenuhi hukum ini tidak menjamin terjadinya proses perpindahan panas tersebut. Untuk mengatasi keterbatasan ini, hukum kedua termodinamika diperkenalkan sebagai prinsip dasar lainnya. Dalam bab ini, kita akan mengilustrasikan bahwa proses kebalikan seperti pada contoh tersebut sebenarnya melanggar hukum kedua. Mendeteksi pelanggaran hukum kedua ini menjadi mudah dengan bantuan konsep entropi. Suatu proses perpindahan panas hanya dapat terjadi jika ia mematuhi hukum pertama dan kedua termodinamika (Çengel dan Boles, 2019).

Hukum termodinamika kedua adalah aturan yang menjelaskan bagaimana energi berperilaku dalam situasi yang berbeda. Hukum ini menyatakan bahwa dalam proses apa pun, jumlah total ketidakteraturan, atau keacakan, di alam semesta cenderung meningkat dari waktu ke waktu (Keifer, 2019). Untuk memahami hal ini, bayangkan sebuah ruangan yang rapi. Jika kita membiarkannya, kemungkinan besar ruangan itu akan menjadi lebih berantakan dibanding ruangan tersebut merapikan dirinya sendiri. Hal ini karena tingkat kekacauan (entropi) secara alami cenderung meningkat.

Demikian pula, hukum kedua memberitahu kita bahwa dalam setiap proses alami, energi cenderung menyebar dan menjadi lebih tidak teratur. Seperti contoh sebelumnya, jika kita memiliki secangkir kopi panas di sebuah ruangan, panas dari kopi akan menyebar dan akhirnya membuat seluruh ruangan menjadi hangat. Hal ini tidak akan secara ajaib

membuat kopi menjadi lebih panas sementara ruangan tetap dingin.

Hukum ini membantu kita memahami mengapa beberapa hal terjadi dan yang lainnya tidak. Hukum ini memberi tahu kita bahwa ada batas-batas pada apa yang dapat terjadi secara alami, dan memandu pemahaman kita tentang bagaimana energi bergerak dan berubah di dunia di sekitar kita (Keifer, 2019). Terdapat dua rumusan atau pernyataan mengenai hukum kedua termodinamika ini: Pertama, pernyataan Kelvin-Planck, dan yang kedua, pernyataan Clausius.

10.3 Pernyataan Kelvin-Planck

Pernyataan Kelvin-Planck tentang hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa tidak mungkin sebuah proses siklik (proses yang kembali ke kondisi awal) hanya mengubah energi panas dari satu reservoir menjadi kerja yang setara tanpa ada kerugian (Çengel dan Boles, 2019).

Sederhananya, ini berarti bahwa kita tidak dapat membuat suatu mesin yang mengambil panas dari satu sumber (reservoir) dan mengubah semua panas tersebut menjadi usaha yang berguna tanpa kehilangan atau pemborosan. Akan selalu ada beberapa bentuk kehilangan atau pemborosan energi selama proses berlangsung.

Pernyataan ini menekankan keterbatasan dalam mengubah energi panas menjadi kerja yang berguna. Ini menyiratkan bahwa beberapa bagian dari energi akan selalu hilang atau tersebar, yang mengarah pada peningkatan gangguan keseluruhan atau entropi sistem.

Pernyataan Kelvin-Planck memberikan prinsip dasar yang memandu desain dan pengoperasian mesin panas, seperti turbin uap dan mesin pembakaran internal, dengan menetapkan batas atas pada efisiensinya. Hal ini menyoroti pentingnya mengelola dan meminimalkan kehilangan energi dalam aplikasi praktis.

10.4 Pernyataan Clausius

Pernyataan Clausius dari hukum termodinamika kedua menyatakan bahwa panas tidak dapat mengalir secara spontan dari benda yang lebih dingin ke benda yang lebih panas tanpa pengaruh dari luar. Dengan kata lain, panas secara alami mengalir dari benda yang lebih panas ke benda yang lebih dingin, dan memerlukan beberapa kerja eksternal atau masukan energi untuk membalikkan aliran ini (Çengel dan Boles, 2019).

Dalam istilah yang lebih sederhana, jika dua benda dengan suhu yang berbeda bersentuhan, panas akan selalu berpindah dari benda yang lebih panas ke benda yang lebih dingin. Ini adalah proses yang alami dan tidak dapat dibalikkan. Sebagai contoh, jika kita meninggalkan secangkir kopi panas di dalam ruangan, pada akhirnya kopi tersebut akan menjadi dingin karena panasnya berpindah ke udara di sekitarnya.

Pernyataan Clausius menyoroti konsep kesetimbangan termal, di mana objek mencapai keadaan seimbang dalam suhu. Hal ini juga menekankan sifat perpindahan panas yang searah, dari suhu yang lebih tinggi ke suhu yang lebih rendah, yang menghasilkan peningkatan entropi keseluruhan atau gangguan sistem.

Pernyataan ini memiliki implikasi penting untuk pemanfaatan dan efisiensi energi. Hal ini menyiratkan bahwa mesin panas, yang mengubah panas menjadi kerja yang berguna, tidak akan pernah bisa mencapai efisiensi 100% karena sejumlah panas akan selalu hilang atau diamburkan. Ini juga menetapkan batas mendasar pada proses tertentu, seperti pendinginan, di mana pekerjaan harus dilakukan untuk memindahkan panas dari daerah yang lebih dingin ke daerah yang lebih panas.

Secara keseluruhan, pernyataan Clausius tentang hukum kedua termodinamika memberikan wawasan tentang arah dan batasan perpindahan panas dan konversi energi, menyoroti ketidakberubahan proses tertentu dan kecenderungan sistem untuk bergerak menuju peningkatan entropi.

10.5 Proses Carnot

Kita telah menyaksikan bahwa, berdasarkan hukum kedua termodinamika, menciptakan mesin panas dengan efisiensi 100 persen antara dua reservoir panas tidak mungkin. Dalam hal ini, berapakah nilai efisiensi maksimum bagi mesin semacam itu? Carnot menemukan bahwa semua mesin reversibel yang beroperasi antara dua reservoir memiliki efisiensi yang sama, dan tidak ada mesin yang dapat memiliki efisiensi yang lebih besar daripada mesin reversibel. Temuan ini dikenal sebagai **teorema Carnot**. Mesin yang reversibel dan beroperasi antara dua reservoir disebut sebagai **mesin Carnot** (Tipler, 1998).

Dari pertimbangan-pertimbangan ini dan pernyataan hukum kedua termodinamika, kita dapat mengidentifikasi beberapa persyaratan yang diperlukan agar suatu proses

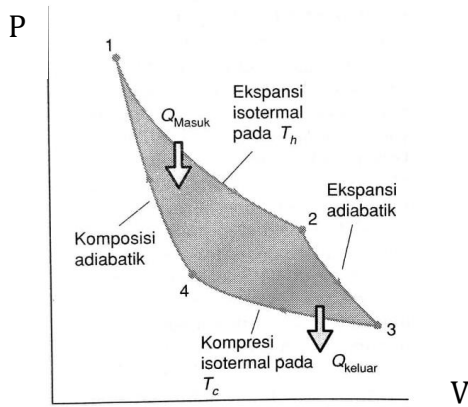
dapat dianggap sebagai proses yang dapat terbalik (reversibel):

1. Tidak ada kehilangan energi mekanik akibat gesekan, gaya viskos, atau gaya disipatif lainnya yang menghasilkan panas.
2. Tidak ada perpindahan panas melalui konduksi karena adanya perbedaan suhu.
3. Proses harus berlangsung secara kuasi-statis, sehingga sistem selalu berada dalam keseimbangan atau mendekati keseimbangan.

Setiap proses yang melanggar salah satu kondisi di atas dianggap sebagai proses yang tidak dapat terbalik (irreversibel). Sebagian besar proses yang terjadi di alam cenderung bersifat irreversibel (Tipler, 1998).

Efisiensi Carnot yang dinyatakan dalam suhu reservoir dapat dihitung dengan mempertimbangkan mesin reversibel yang menggunakan gas ideal sebagai bahan kerjanya. Proses yang dapat terbalik ini disebut **proses Carnot**. Gambar 10.3 menggambarkan proses (siklus) Carnot untuk gas ideal. Proses dimulai dari keadaan 1 dengan penyerapan panas secara isothermal dan kuasi-statis dari reservoir panas pada suhu T_h . Karena penyerapan panas terjadi secara isothermal, proses ini dapat dibalik tanpa melanggar hukum kedua termodinamika. Usaha dilakukan oleh gas saat ekspansi menuju ke keadaan 2. Dari keadaan 2 ke keadaan 3, gas mengalami ekspansi secara adiabatik, yang berarti tidak ada pertukaran panas terjadi. Jika ekspansi ini dilakukan secara kuasi-statis, maka proses ini bersifat reversibel. Lebih banyak usaha dilakukan oleh gas, dan suhu gas turun menjadi T_c . Bagian ketiga dari siklus ini adalah kompresi isothermal pada suhu T_c dari keadaan 3 ke keadaan 4. Selama tahap ini, usaha dilakukan pada gas, dan panas Q_c dibuang ke reservoir

dingin pada suhu T_c . Bagian terakhir dari proses ini adalah kompresi adiabatik dari keadaan 4 kembali ke keadaan awal 1. Usaha kembali dilakukan pada gas selama kompresi ini. Usaha neto yang dilakukan selama siklus ini dinyatakan oleh luas area pada grafik (Tipler, 1998).



Gambar 10.3 Proses/siklus Carnot untuk gas ideal.
(Sumber : Tipler, 1998)

Untuk mengungkapkan efisiensi siklus ini, kita perlu menghitung jumlah panas yang diserap dari reservoir panas dan jumlah panas yang dibuang ke reservoir dingin. Pertama, mari kita perhatikan ekspansi isothermal dari keadaan 1 ke keadaan 2. Karena energi dalam gas ideal tetap konstan selama ekspansi isothermal, jumlah usaha yang dilakukan oleh gas sama dengan jumlah panas yang diserap dari reservoir panas. Dengan demikian, jumlah panas yang diserap adalah

$$Q_h = W = \int_{v_1}^{v_2} P dV = \int_{v_1}^{v_2} \frac{nRT_h}{V} dV \quad (10.1)$$

Sehingga

$$Q_h = nRT_h \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (10.2)$$

Secara serupa, jumlah panas yang dibuang ke reservoir dingin sama dengan jumlah usaha yang dilakukan pada gas selama proses kompresi isothermal dari keadaan 3 ke keadaan 4 pada suhu T_c . Jumlah usaha ini sama dengan jumlah usaha yang dilakukan pada gas jika mengembang dari keadaan 4 ke keadaan 3. Dengan demikian, jumlah panas yang dibuang adalah

$$|Q_c| = nRT_c \ln \frac{V_3}{V_4} \quad (10.3)$$

Rasio $|Q_c|$ dan Q_h menjadi

$$\frac{|Q_c|}{Q_h} = \frac{T_c \ln(V_3/V_4)}{T_h \ln(V_2/V_1)} \quad (10.4)$$

Kita dapat menghubungkan volume V_1 , V_2 , V_3 , dan V_4 dengan menggunakan persamaan untuk ekspansi adiabatik kuasi-statik:

$$TV^{\gamma-1} = \text{konstan} \quad (10.5)$$

Dengan menggunakan persamaan (10.5) pada ekspansi dari keadaan 2 ke keadaan 3, kita mendapatkan

$$T_h V_2^{\gamma-1} = T_c V_3^{\gamma-1} \quad (10.6)$$

Dengan cara yang sama, untuk kompresi adiabatik dari keadaan 4 ke keadaan 1, kita mendapatkan

$$T_h V_1^{\gamma-1} = T_c V_4^{\gamma-1} \quad (10.7)$$

Membagi persamaan (10.6) dengan persamaan (10.7), kita mendapatkan

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\gamma-1} \quad (10.8)$$

Dengan demikian, $V_2/V_1 = V_3/V_4$. Selanjutnya $\ln(V_2/V_1) = \ln(V_3/V_4)$, sehingga kita dapat menghilangkan suku logaritmik pada persamaan (13.4). Jadi kita mendapatkan

$$\frac{|Q_c|}{Q_h} = \frac{T_c}{T_h} \quad (10.9)$$

Sehingga efisiensi Carnot ϵ_c adalah

$$\epsilon_c = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (10.10)$$

Persamaan (13.10) berlaku untuk tiap mesin reversibel yang bekerja di antara reservoir dengan temperatur T_h dan T_c (Tipler, 1998).

DAFTAR PUSTAKA

- Carnot, S. (1890). *Reflections on the Motive Power of Heat*. Translated by H. Thurston. New York: J. Wiley & Sons.
- Çengel, Y. and Boles, M. (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. New York: Mcgraw-Hill Education.
- Keifer, D. (2019). Enthalpy and the Second Law of Thermodynamics. *Journal of Chemical Education*, 96(7), pp.1407–1411.
- Laranjeiras, C. and Portela, S. (2016). The Carnot cycle and the teaching of thermodynamics: a historical approach. *Physics Education*, 51(5).
- Ling, S., Sanny, J., Moebs, W. and Vin, A. (2018). *University Physics*. Houston, Texas: Openstax Rice University.
- Shang, R., Zhang, Y., Shi, W., Wang, X. and Zhang, Y. (2014). Fresh Look and Understanding on Carnot Cycle. *Energy Procedia*, 61, pp.2898–2901.
- Tipler, P. (1998). *Fisika untuk Sains dan Teknik*. 3rd ed. Translated by L. Prasetio. and R. Adi. Jakarta: Penerbit Elangga.

BAB 11

POTENSIAL TERMODINAMIKA: ENERGI DALAM DAN TRANSFORMASI LEGENDRE

Oleh Muhammad Lawrence Pattersons

11.1 Pendahuluan

Pembahasan mengenai potensial termodinamika adalah pembahasan yang sangat penting, namun melibatkan kompleksitas dan abstraksi. Hal tersebut dikarenakan pembahasan ini mencakup penjelasan mengenai energi dalam dan transformasi Legendre.

Sebagian pembahasan dalam bab ini bukan barang baru yang benar-benar terpisah dari bab-bab sebelumnya. Pada saat membahas hukum pertama termodinamika, kita sudah bersentuhan dengan salah satu komponen dalam bab ini, yaitu energi dalam U . Zemansky & Dittman (1997) memberikan contoh mengenai suatu sistem hidrostatik. Pada sistem tersebut, hukum pertama termodinamika dinyatakan sebagai

$$dU = -P dV + T dS, \quad (11.1)$$

di mana dU adalah diferensial energi dalam, P adalah tekanan, dV adalah diferensial volume, T adalah suhu, dan dS adalah diferensial dari entropi. Pada persamaan (11.1), suku kedua merupakan diferensial dari kalor dQ .

Dalam pembahasan bab ini, penulis juga akan memberikan sedikit sentuhan mekanika statistik sebagai pengetahuan tambahan bagi konsep termodinamika yang sedang ditinjau. Tentunya bahasan mekanika statistik tidak akan dijabarkan secara mendalam, tetapi hanya disertakan agar pemahaman pembaca mengenai potensial termodinamika menjadi lebih komplrit.

Seyogyanya para pembaca sudah lulus dari mata kuliah Kalkulus dan/atau Matematika Dasar, sehingga memiliki kemampuan yang mapan untuk memahami dan memecahkan permasalahan-permasalahan Kalkulus dan/atau Matematika Dasar. Penulis tidak menurunkan persamaan matematis secara mendetail di dalam bab ini. Selain itu, pemahaman yang baik dalam mata kuliah Fisika Dasar dan Statistika juga akan sangat membantu pembaca dalam memahami kandungan bab ini. Ketimbang mempelajari bab ini sambil meriang, mari mempelajari bab ini dengan gembira dan riang.

11.2 Gagasan tentang Potensial Termodinamika

Schaefer (1970) menyebutkan analogi potensial di dalam mekanika klasik dengan besaran di dalam termodinamika. Ketika kita mempelajari mekanika klasik, kita memiliki gagasan tentang energi sebagai potensial untuk menghitung gaya. Untuk suatu benda dengan massa yang konstan, jika ada perubahan *infinitesimal* (sangat kecil) dari energi dE , maka gaya dapat ditulis sebagai

$$F = \frac{dE}{dr}, \quad (11.2)$$

di mana dr adalah perubahan *infinitesimal* dari radius antara benda dan pusat gaya. Kita juga dapat membangun analogi untuk kasus termodinamika bagi persamaan (11.2), di mana

expansive mechanical force (yaitu tekanan dalam suatu proses termodinamika) dapat dinyatakan sebagai

$$P = -\frac{dE}{dV}, \quad (11.3)$$

di mana dV adalah perubahan *infinitesimal* dari volume, dan tanda minus menunjukkan penurunan volume untuk peningkatan energi, atau P dalam kasus ini merupakan tekanan kompresi.

Berdasarkan persamaan (11.2), generalisasi dapat dilakukan, yaitu

$$\Phi_x = \left(\frac{\partial E_x}{\partial x} \right)_{y,z}, \quad (11.4)$$

dengan Φ_x adalah potensial, E_x adalah energi yang terasosiasi dengan Φ_x , dan x adalah variabel konjugasi.

Di dalam termodinamika, energi system dapat ditunjukkan oleh energi dalam U , sehingga berdasarkan bentuk yang diperumum dalam persamaan (11.4), persamaan (11.2) dapat ditulis sebagai

$$P = -\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_S. \quad (11.5)$$

Mengingat bahwa hubungan suhu T dan entropi S dapat dinyatakan sebagai

$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V, \quad (11.6)$$

maka dapat kita katakan bahwa U adalah suatu potensial di dalam termodinamika, dan memenuhi analogi potensial pada mekanika klasik.

Bersama dengan energi dalam, terdapat 3 buah potensial termodinamika lainnya: entalpi, energi bebas Helmholtz, dan

energi Gibbs (Lubarda, 2004). Pada subbab ini akan dipaparkan definisi dari setiap potensial termodinamika.

11.2.1 Energi Dalam

Untuk suatu sistem termodinamika sederhana, energi dalam adalah suatu energi termodinamika, yang mana perubahannya diakibatkan oleh kalor yang tertransfer ke dalam sistem, dan usaha yang dikerjakan pada sistem (International Organization for Standardization [ISO], 2019).

11.2.2 Entalpi

Entalpi adalah penjumlahan dari energi dalam dengan hasil perkalian antara tekanan dan volume dari suatu sistem termodinamika (International Organization for Standardization [ISO], 2019). Pada reaksi kimia yang tidak melibatkan usaha yang berekspansi, maka nilai perubahan entalpi sama dengan perubahan kalor (Keifer, 2019).

11.2.3 Energi Bebas Helmholtz

Energi bebas Helmholtz adalah selisih antara energi dalam dengan hasil perkalian antara suhu dan entropi suatu sistem termodinamika (International Organization for Standardization [ISO], 2019). Energi bebas Helmholtz berperan sebagai energi yang tersedia untuk melakukan usaha (Adriaans & van Benthem, 2008).

11.2.4 Energi Bebas Gibbs

Energi bebas Gibbs adalah selisih antara energi bebas Helmholtz dengan hasil perkalian antara suhu dan entropi suatu sistem termodinamika (International Organization for Standardization [ISO], 2019). Lebih jelasnya, energi bebas Gibbs adalah energi yang dapat digunakan untuk

memperoleh usaha maksimum dalam suatu proses pada suhu dan tekanan yang konstan (Hanlon, 2020).

11.3 Konstruksi Formulasi Energi Dalam

Untuk memahami tinjauan mikroskopis mengenai energi dalam, kita harus terlebih dahulu memahami permodelan *ensemble*. *Ensemble* adalah kelompok yang anggotanya terdiri dari *assembly-assembly*. *Assembly* itu sendiri adalah kesatuan yang terdiri dari sistem-sistem. Salah satu contoh *assembly* adalah logam, di mana atom-atom dalam logam tersebut adalah sistem-sistem di dalam *assembly*. Ada tiga macam *ensemble*, yaitu *microcanonical ensemble*, *canonical ensemble*, dan *grand canonical ensemble* (Abdullah, 2017).

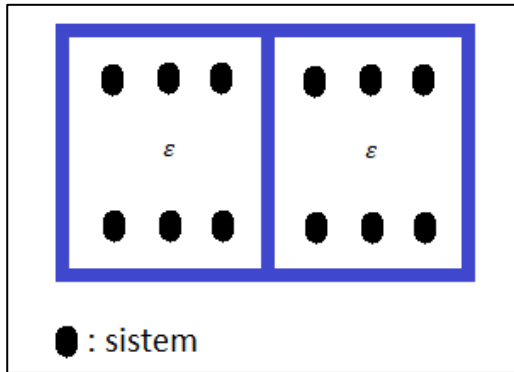
11.3.1 *Microcanonical Ensemble*

Microcanonical ensemble adalah suatu *ensemble* yang *assembly*-nya memiliki sifat-sifat yang sangat ketat, yaitu semua *assembly* bersifat identik: memiliki jumlah sistem dan besar energi yang sama; kemudian juga setiap *assembly* tidak ditembus oleh sistem maupun energi (Abdullah, 2017). *Microcanonical ensemble* dapat diaplikasikan pada sistem yang terisolasi yang keadaan makroskopisnya ditunjukkan oleh energi totalnya dan beberapa variabel makroskopisnya, seperti volume dan jumlah partikel (Sekerka, 2015).

Keidentikan besar energi di dalam satu *assembly* memungkinkan kita menghitung energi dalam bagi *ensemble* tersebut. Secara sederhana, kita dapat menuliskan energi dalam U bagi suatu *microcanonical ensemble* sebagai

$$U = N\varepsilon, \quad (11.7)$$

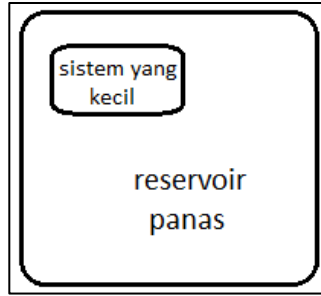
di mana N adalah jumlah *assembly* di dalam *ensemble*, dan ϵ adalah energi pada tiap *assembly*.



Gambar 11.1 Ilustrasi suatu *microcanonical ensemble* yang terdiri dari dua buah *assembly* yang masing-masing memiliki energi sebesar ϵ , terdiri dari enam buah sistem, dan garis-garis biru yang mengilustrasikan dinding-dinding yang menghalangi perpindahan sistem dan energi ke *assembly* lain

11.3.2 Canonical Ensemble

Suatu *ensemble* dikatakan sebagai *canonical ensemble* jika semua *assembly*-nya tidak dapat ditembus sistem, tetapi dapat ditembus oleh energi. Pada *ensemble* ini, jumlah sistem dalam setiap *assembly*-nya sama, namun mereka boleh memiliki energi yang berbeda-beda. Meskipun demikian, jumlah total energi di dalam *ensemble* adalah konstan (Abdullah, 2017).



Gambar 11.2 Contoh *canonical ensemble*

Untuk kasus *canonical ensemble*, para *assembly* penyusunnya tidak harus identik. Huang (2010) memberikan contoh *canonical ensemble* yang terdiri dari suatu reservoir panas dan suatu sistem yang kecil, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 11.2.

Abdullah (2017) telah menuliskan konstruksi formulasi untuk mendapatkan energi dalam suatu *canonical ensemble*. Konstruksi tersebut diawali dari probabilitas mendapatkan energi ε_i , yaitu energi dari *assembly* ke- i dari suatu *canonical ensemble*. Probabilitas tersebut dinyatakan sebagai

$$p_i = C e^{-\frac{\varepsilon_i}{k_B T}}, \quad (11.8)$$

di mana C adalah konstanta normalisasi yang bergantung pada suhu, dan k_B adalah konstanta Boltzmann yang diaproksimasi dengan nilai $1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ (Pitre dkk., 2019), dan T adalah suhu. Secara matematis, C dapat dituliskan sebagai

$$C = \frac{1}{\sum_i e^{-\varepsilon_i/k_B T}} = \frac{1}{Z_c}, \quad (11.9)$$

dengan

$$Z_c = \sum_i e^{-\varepsilon_i/k_B T}. \quad (11.10)$$

Sekarang persamaan (11.8) dapat ditulis sebagai

$$p_i = \frac{e^{\frac{\varepsilon_i}{k_B T}}}{Z_c}. \quad (11.11)$$

Energi rata-rata *assembly* memenuhi persamaan

$$\bar{E} = \sum_i \varepsilon_i p_i. \quad (11.12)$$

Dengan memisalkan $-\frac{1}{kT} = \beta$, maka persamaan (11.12) dapat ditulis sebagai

$$\bar{E} = \frac{1}{Z} \sum_i \varepsilon_i e^{\beta \varepsilon_i}. \quad (11.13)$$

Mengingat bahwa ε_i bernilai konstan, maka dengan menerapkan sedikit prinsip kalkulus, kita mendapatkan

$$\bar{E} = \frac{\partial}{\partial \beta} \ln Z_c, \quad (11.14)$$

dan dengan menerapkan sedikit prinsip-prinsip aljabar dan kalkulus, kita memperoleh

$$\bar{E} = k_B T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln Z_c. \quad (11.15)$$

Untuk N buah *assembly* yang berada di dalam sebuah *canonical ensemble*, maka kita bisa memperoleh energi dalam U bagi *ensemble* tersebut sebagai

$$U = N k_B T^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln Z_c. \quad (11.16)$$

Ekspresi matematis dari Z_c dapat berbeda tergantung kasus yang ditinjau. Kasus yang berbeda boleh jadi memiliki ekspresi Z_c yang berbeda. Huang (2010) memberikan ekspresi matematis bagi Z_c yang diperumum dalam integral ruang fase, yaitu

$$Z_c(T, V) = \int \frac{d\mathbf{p} d\mathbf{q}}{N! h^{3N}} e^{\beta H(\mathbf{p}, \mathbf{q})}, \quad (11.17)$$

di mana $d\mathbf{p} = d^{3N} \mathbf{p}$, $d\mathbf{q} = d^{3N} \mathbf{q}$ (setiap integral $d^3 q$ mencakup volume V), $\mathbf{p}$ adalah momentum *assembly*, $\mathbf{q}$ adalah koordinat yang diperumum dari *assembly*, dan $H(\mathbf{p}, \mathbf{q})$

adalah Hamiltonian dari *assembly*, dan h adalah konstanta Planck. Pembahasan mendalam mengenai hal ini adalah pembahasan dalam mekanika statistik, yang mana hal tersebut berada di luar cakupan buku ini. Untuk bahan bacaan lebih jauh mengenai hal tersebut, pembaca dapat menemukannya di dalam Abdullah (2007), Abdullah (2017), dan Huang (2010). Pembaca juga dapat menemukan pembahasan lebih jauh mengenai momentum, koordinat yang diperumum, dan Hamiltonian di dalam Goldstein dkk. (2002).

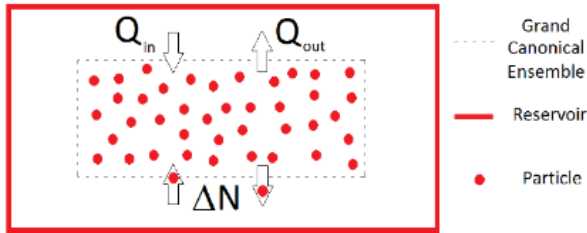
11.3.3 *Grand Canonical Ensemble*

Grand canonical ensemble adalah *ensemble* dengan aturan yang sangat longgar, yaitu pertukaran sistem antar *assembly* dan pertukaran energi antar *assembly* dimungkinkan untuk terjadi (Abdullah, 2007). Pada aplikasinya, *ensemble* ini sangat berguna pada pembahasan partikel-partikel gas kuantum (Salinas, 2001). Abdullah (2017) juga menjelaskan bahwa salah satu contoh dari *ensemble* yang memiliki sifat seperti ini adalah udara di ruang terbuka, di mana udara tersebut ditinjau sebagai kumpulan atom-atom atau molekul-molekul yang berada di dalam kotak-kotak yang memiliki dinding khayal yang dapat ditembus oleh sistem dan energi.

Kita sudah mengetahui ekspresi energi dalam berdasarkan hukum pertama termodinamika yang ditunjukkan oleh persamaan (11.1). Sekarang kita tinjau suatu *assembly* di dalam *grand canonical ensemble* yang dapat mengalami penambahan atau pengurangan sistem. Misalkan penambahan satu sistem berimpak pada perubahan energi μ , dan pengurangan satu sistem berimpak pada pengurangan

energi sebesar μ , maka perubahan sistem sejumlah dN menghasilkan perubahan energi sebesar μdN (Abdullah, 2017). Berdasarkan gambaran tersebut, persamaan (11.1) termodifikasi menjadi

$$dU = -P dV + T dS + \mu dN. \quad (11.18)$$



Gambar 11.3 Ilustrasi contoh kasus *grand canonical ensemble*: energi panas Q_{in} leluasa masuk ke dalam *assembly*, dan energi panas Q_{out} leluasa keluar *assembly*; demikian juga sekumpulan partikel ΔN leluasa masuk ke dalam *assembly* dan keluar dari *assembly* (Sumber : Kok dkk., 2016)

Berdasarkan Abdullah (2017), persamaan (11.18) dapat dikembangkan lagi untuk kasus di mana beberapa jenis sistem dalam *assembly* yang dapat keluar dan masuk *assembly* dengan energi per sistem untuk jenis partikel ke- i dimisalkan sebagai μ_i , sehingga ekspresi matematis persamaan (11.18) menjadi

$$dU = -P dV + T dS + \sum_i \mu_i dN_i. \quad (11.19)$$

Berdasarkan perhitungan dalam mekanika statistik, peluang untuk mendapatkan *assembly* dengan energi ε_i dan jumlah sistem N_i dinyatakan sebagai

$$p_i = \frac{e^{(\mu N_i - \varepsilon_i)/k_B T}}{Z_g}, \quad (11.20)$$

dengan

$$Z_g = \sum_i e^{(\mu N_i - \varepsilon_i)/k_B T}. \quad (11.21)$$

Berdasarkan Huang (2010), secara umum ekspresi matematis bagi energi dalam pada *grand canonical ensemble* mirip dengan energi dalam pada *canonical ensemble*, di mana energi rata-rata dari semua *assembly* dinyatakan sebagai

$$\bar{E} = \frac{\partial}{\partial \beta} \ln Z_g, \quad (11.22)$$

sehingga untuk N buah *assembly*, energi dalam bagi *grand canonical ensemble* adalah

$$U = N \frac{\partial}{\partial \beta} \ln Z_g. \quad (11.23)$$

Mengenai aspek-aspek fisika statistik yang lebih lanjut dalam pembahasan *grand canonical ensemble*, pembaca dapat membacanya di dalam Abdullah (2007), Abdullah (2017), dan Huang (2010).

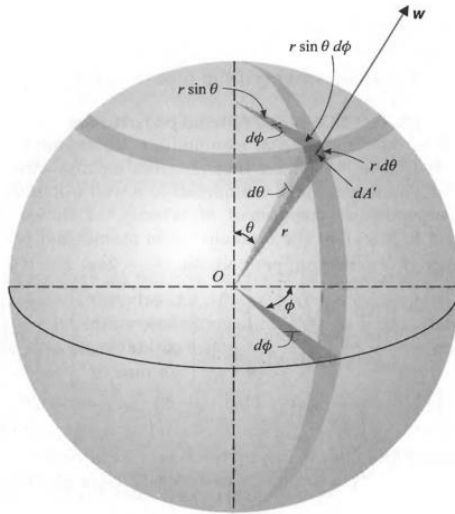
11.3.4 Perumusan Energi Dalam Gas Ideal

Ada baiknya kita menyegarkan ingatan kita mengenai gas ideal. Zemansky & Dittman (1997) menyebutkan asumsi-asumsi untuk perilaku atom-atom gas ideal yang bersifat monoatom:

1. Semua sampel kecil dari gas mencakup partikel-partikel dalam jumlah yang sangat banyak sebesar N . Untuk gas yang hanya memiliki satu jenis atom, semua atomnya identik dan lembam.
2. Atom-atom gas ideal dianggap sebagai bola keras yang kecil dan mirip satu-sama lain, bergerak dengan gerakan

- terus-menerus. Ukuran atom jauh lebih kecil daripada jarak antara atom-atom tersebut.
3. Atom-atom gas ideal dianggap tidak mengalami tarikan maupun tolakan satu sama lain, kecuali ketika mereka bertumbukan dengan dinding atau dengan sesama atom.
 4. Bagian dinding yang bertumbukan dengan atom dianggap halus, dan tumbukan bersifat elastis sempurna. Jika atom bergerak dengan kecepatan w , hanya komponen tegak lurus dinding $w_{\perp}$ yang berubah akibat tumbukan menjadi $-w_{\perp}$.
 5. Ketika tidak ada gaya luar, atom-atom terdistribusi seragam pada wadah tertutup dari gas ideal tersebut. Densitas jumlah partikel $\frac{N}{V}$ dianggap konstan, sehingga elemen *infinitesimal* dari jumlah partikel adalah $dN = \frac{N}{V} dV$.
 6. Tidak ada preferensi arah kecepatan bagi atom mana pun.
 7. Tidak semua atom memiliki kecepatan yang sama, di mana rentangnya adalah dari 0 sampai kecepatan cahaya.

Setelah kita menyegarkan kembali ingatan kita tentang asumsi-asumsi yang kita terapkan pada gas ideal, maka sekarang saatnya untuk menurunkan persamaan energi dalam gas ideal. Penurunan ini didasarkan pada penurunan yang terdapat pada Zemansky & Dittman (1997). Tinjaulah suatu sistem koordinat bola yang ditunjukkan oleh gambar 11.4.



Gambar 11.4 Sudut solid $d\Omega = \sin \theta \, d\theta d\phi$
(Sumber : Zemansky & Dittman, 1997)

Anggap suatu vektor kecepatan $\mathbf{w}$ pada arah sembarang, berasal dari titik O . Elemen *infinitesimal* dari luas permukaan bola dA' dapat dituliskan sebagai

$$dA' = (r \, d\theta)(r \sin \theta \, d\phi) = r^2 \sin \theta \, d\theta d\phi. \quad (11.24)$$

Dalam hal ini, didefinisikan suatu sudut solid $d\Omega$ yang dibentuk oleh garis-garis yang meradiasi dari O dan menyentuh dA' , yaitu

$$d\Omega = \frac{dA'}{r^2} = \sin \theta \, d\theta d\phi. \quad (11.25)$$

Perlu diingat bahwa luas maksimum bola adalah $4\pi r^2$, sehingga sudut solid maksimum adalah 4π .

Anggap terdapat atom-atom yang memiliki kecepatan antara w dan $w + dw$, yang vektor-vektor kecepataannya bertetangga dengan $\mathbf{w}$ dan masih tercakup oleh $d\Omega$. Jika dN_w adalah jumlah atom yang memiliki kecepatan antara w dan

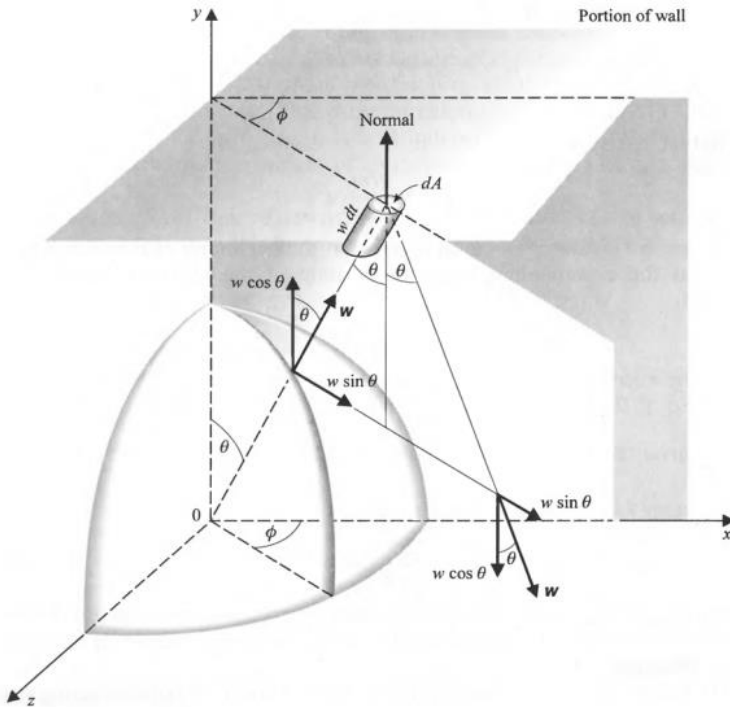
$w + dw$, maka jumlah atom dengan rentang kecepatan dw , dalam rentang sudut-sudut $d\theta$ dan $d\phi$ dinyatakan sebagai

$$d^3N_{w,\theta,\phi} = dN_w \frac{d\Omega}{4\pi}. \quad (11.26)$$

Sekarang pandang gambar 14.5. Andaikan ada sekelompok atom gas ideal dengan jumlah $d^3N_{w,\theta,\phi}$ dan kecepatan w mendekati elemen *infinitesimal* dA yang merupakan bagian dari luas wadah tertutup. Atom-atom tersebut tidak mengalami tumbukan selama selang waktu yang singkat dt , setidaknya sampai sekelompok atom tersebut menumbuk dinding di area dA , sedemikian rupa sehingga terbentuk suatu silinder kecil dengan luas alas dA dan panjang $w dt$, maka volume silinder tersebut adalah

$$dV = w dt \cos \theta dA. \quad (11.27)$$

Jika volume silinder tersebut adalah V , maka akan ada sejumlah atom dengan rasio $\frac{dV}{V}$ dari $d^3N_{w,\theta,\phi}$ yang berada di dalam silinder tersebut.



Gambar 11.5 Ilustrasi geometris tentang sekelompok atom yang mendekati elemen dA
(Sumber : Zemansky & Dittman, 1997)

Dengan demikian, jumlah atom yang menumbuk dA dalam selang waktu dt adalah

$$dv = d^3 N_{w,\theta,\phi} \frac{dv}{v}. \quad (11.28)$$

Dari ilustrasi kasus dalam gambar 11.5, perubahan momentum sebuah atom akibat tumbukan tersebut adalah

$$dp = -2mw \cos \theta, \quad (11.29)$$

dengan m adalah massa atom. Berdasarkan persamaan (11.26), persamaan (11.28), dan persamaan (11.29), perubahan total dari momentum dinyatakan sebagai

$$\begin{aligned}\Delta p &= \left(dN_w \frac{d\Omega}{4\pi} \right) \left(\frac{dV}{V} \right) (-2mw \cos \theta), \\ \Delta p &= \left(\frac{dN_w}{4\pi} \sin \theta \, d\theta d\phi \right) \left(\frac{1}{V} w \, dt \cos \theta \, dA \right) \quad (11.30) \\ &\quad \times (-2mw \cos \theta).\end{aligned}$$

Perubahan total dari momentum per satuan luas per satuan waktu akibat tumbukan dari segala arah adalah tekanan dP_w dari tembok terhadap sejumlah atom sebanyak dN_w . Dengan mengubah tanda pada perubahan total dari momentum, kita dapat memperoleh tekanan dP_w oleh sejumlah atom dN_w terhadap tembok, yaitu

$$dP_w = mw^2 \frac{dN_w}{V} \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \theta \, d\theta \right). \quad (11.31)$$

Dengan sedikit penerapan kalkulus, sangat mudah untuk membuktikan bahwa ekspresi di dalam kurung pada persamaan (11.31) bernilai $\frac{1}{3}$, sehingga persamaan (11.31) menjadi

$$PV = \frac{1}{3} m \int_0^\infty w^2 \, dN_w. \quad (11.32)$$

Ekspresi di dalam integral pada persamaan (11.32) tidak lain adalah perkalian antara jumlah partikel N dan rerata dari kuadrat kecepatan atom $\overline{w^2}$, sehingga persamaan (11.32) menjadi

$$PV = \frac{Nm}{3} \overline{w^2}. \quad (11.33)$$

Dengan mempertimbangkan persamaan gas ideal $PV = nRT$, maka

$$\begin{aligned}nRT &= \frac{Nm}{3} \overline{w^2}, \\ T &= \frac{2N}{3nR} \left(\frac{1}{2} m \overline{w^2} \right).\end{aligned} \quad (11.34)$$

di mana n adalah jumlah zat dalam mol, dan R adalah konstanta gas ideal.

Dalam teori kinetik gas, energi dalam gas ideal dianggap sebagai total dari energi kinetik partikel-partikel gas, yaitu

$$U = N \left(\frac{1}{2} m \overline{w^2} \right). \quad (11.35)$$

Dengan menggabungkan persamaan (11.34) dan persamaan (11.35), diperoleh

$$U = \frac{3}{2} nRT, \quad (11.35)$$

yang merupakan suatu persamaan yang sudah sangat familiar sejak di jenjang sekolah menengah.

11.4 Transformasi Legendre

Adrien-Marie Legendre (1752 – 1833) memberikan sumbangsih dalam bidang analisis, teori bilangan, dan mekanika benda langit (Duren, 2009). Di antara pekerjaan Legendre yang memiliki dampak besar adalah polinom Legendre, yang dapat diaplikasikan pada perumusan Hartle-Thorne untuk bintang neutron (Pattersons & Sulaksono, 2021); fungsi Legendre terasosiasi, yang dapat diaplikasikan pada perumusan elemen sudut dalam persamaan Schroedinger tiga dimensi (Griffiths, 1994), dan transformasi Legendre yang dapat diaplikasikan pada permasalahan mekanika dan termodinamika (Boas, 2006; Goldstein dkk., 2002; Huang, 2010).

11.4.1 Formulasi Transformasi Legendre

Berikut ini akan dipaparkan formulasi transformasi Legendre berdasarkan perumusan yang terdapat dalam Boas (2006).

Andaikan terdapat suatu fungsi $f(x, y)$, maka

$$df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy. \quad (11.36)$$

Kita misalkan $p = \frac{\partial f}{\partial x}$ dan $q = \frac{\partial f}{\partial y}$; maka

$$df = p dx + q dy. \quad (11.37)$$

Sekarang kita kurangkan df dengan $d(qy)$, sehingga kita memperoleh

$$\begin{aligned} df - d(qy) &= p dx + q dy - q dy - y dq, \\ d(f - qy) &= p dx - y dq. \end{aligned} \quad (11.38)$$

Jika kita mendefinisikan sebuah fungsi $g \equiv f - qy$, maka kita dapat menuliskan persamaan (11.38) menjadi

$$dg = p dx - y dq. \quad (11.39)$$

Dalam persamaan (11.39), dapat kita lihat bahwa elemen *infinitesimal* yang muncul adalah dx dan dq , sehingga lebih elok jika kita tuliskan g sebagai fungsi dengan variabel x dan q . Dengan demikian turunan parsial dari g bisa kita nyatakan sebagai

$$\frac{\partial g}{\partial x} = p, \quad \frac{\partial g}{\partial q} = -y. \quad (11.40)$$

Dengan cara yang sama, kita bisa mengubah suku $p dx$ menjadi $-x dp$ untuk fungsi $f - xp$. Perubahan variabel-variabel independen ini disebut sebagai transformasi Legendre.

Persamaan (11.40) dapat kita kembangkan menjadi

$$\frac{\partial^2 g}{\partial q \partial x} = \left(\frac{\partial p}{\partial q} \right)_x, \quad \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial q} = - \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_q, \quad (11.41)$$

sehingga

$$\left(\frac{\partial p}{\partial q} \right)_x = - \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_q. \quad (11.42)$$

11.4.2 Aplikasi Transformasi Legendre pada Potensial-potensial Termodinamika

Pada subbab 11.2, kita sudah membahas sekilas mengenai potensial-potensial termodinamika. Sebelumnya kita juga telah membahas energi dalam U secara cukup mendalam, maka sekarang saatnya kita libatkan potensial-potensial termodinamika lainnya dalam pembahasan kita. Sekarang saatnya kita mulai masuk ke dalam ekspresi-ekspresi matematis yang melibatkan potensial-potensial termodinamika.

Pembahasan dalam subsubbab ini didasarkan pada Zemansky & Dittman (1997). Terkadang kita memiliki suatu fungsi dengan variabel-variabel tertentu, namun akan lebih mudah bagi kita bekerja dengan variabel lain yang melibatkan fungsi lain. Hal tersebut diakomodasi oleh transformasi Legendre. Untuk lebih jelasnya, perhatikan ilustrasi berikut ini. Berdasarkan persamaan (11.1), kita dapat menghitung U ketika terjadi perubahan volume V dan entropi S . Untuk keadaan yang lain yang membutuhkan variabel lain, kita memerlukan fungsi lainnya. Dalam hal ini, cukup menguntungkan jika kita menggunakan transformasi Legendre dengan mendefinisikan entalpi H dalam perhitungan. Secara matematis, entalpi didefinisikan sebagai

$$H \equiv U + PV, \quad (11.43)$$

di mana P adalah tekanan, dan V adalah volume. Dengan Kembali mengingat persamaan (11.1), maka

$$dH = V dP + T dS, \quad (11.44)$$

di mana T adalah suhu, dan S adalah entropi. Dari persamaan (11.44) kita dapat melihat bahwa perubahan entalpi adalah fungsi dengan variabel P dan perubahan entropi S .

Untuk memperoleh fungsi dengan variable lainnya, kita gunakan transformasi Legendre lagi untuk mendefinisikan energi bebas Helmholtz A , yaitu

$$A \equiv U - TS, \quad (11.45)$$

yang mana dengan sangat mudah kita peroleh bentuk diferensialnya, yaitu

$$dA = -S dT - P dV, \quad (11.46)$$

yang merupakan fungsi dengan variabel T dan V .

Didefinisikan juga energi bebas Gibbs G sebagai transformasi Legendre dari entalpi, yaitu

$$G \equiv H - TS, \quad (11.47)$$

yang mana bentuk diferensialnya adalah

$$dG = V dP - S dT. \quad (11.48)$$

Terlihat jelas bahwa G adalah fungsi yang terkarakterisasi oleh P dan T .

Sekarang kita kumpulkan persamaan (11.1), (11.44), (11.46), dan (11.48) sebagai satu rangkaian persamaan-persamaan diferensial yang kompak:

$$dU = -P dV + T dS,$$

$$dH = V dP + T dS,$$

$$dA = -P dV - S dT,$$

$$dG = V dP - S dT.$$

Dengan mengikuti pola matematis pada persamaan (11.40); dapat kita simpulkan untuk persamaan (11.1)

$$P = -\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S, \quad (11.49)$$

$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V ; \quad (11.50)$$

untuk persamaan (11.44)

$$T = - \left(\frac{\partial H}{\partial S} \right)_P , \quad (11.51)$$

$$V = \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_S ; \quad (11.52)$$

untuk persamaan (11.46)

$$P = - \left(\frac{\partial A}{\partial V} \right)_T , \quad (11.53)$$

$$S = - \left(\frac{\partial A}{\partial T} \right)_V ; \quad (11.54)$$

dan untuk untuk persamaan (11.48)

$$V = \left(\frac{\partial G}{\partial P} \right)_T , \quad (11.55)$$

$$S = - \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P . \quad (11.56)$$

Dengan mengikuti pola matematis pada persamaan (11.42);
untuk persamaan 11.1 kita peroleh

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_S = - \left(\frac{\partial P}{\partial S} \right)_V , \quad (11.57)$$

untuk persamaan (11.44) kita peroleh

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S} \right)_P , \quad (11.58)$$

untuk persamaan (11.46) kita peroleh

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V , \quad (11.59)$$

dan untuk persamaan (11.48) kita peroleh

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T = - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P . \quad (11.60)$$

Persamaan (11.57) sampai persamaan (11.60) disebut sebagai relasi Maxwell.

11.5 Pengayaan: Potensial Kimia

Pada subsubbab 11.3.3, kita telah menyinggung perubahan energi sebesar μdN . Perlu diketahui bahwa faktor μ tersebut dikenal sebagai potensial kimia. Sekarang kita akan menurunkan formulasi untuk potensial kimia berdasarkan Huang (2010).

Terjadinya perubahan jumlah partikel sejumlah dN , menyebabkan hukum I termodinamika dapat digeneralisasi menjadi

$$dU = dQ - dW + \mu dN, \quad (11.61)$$

di mana dQ adalah diferensial panas, dan dW adalah diferensial usaha.

Untuk system gas-likuid,

$$dU = T dS - P dV + \mu dN. \quad (11.62)$$

Perubahan energi bebas Helmholtz pun kita tulis sebagai

$$dA = -S dT - P dV + \mu dN, \quad (11.63)$$

sehingga dapat kita simpulkan

$$\mu = \left(\frac{\partial A}{\partial N} \right)_{V,T}. \quad (11.64)$$

Perubahan energi bebas Gibbs dapat kita nyatakan sebagai

$$dG = -S dT - V dP + \mu dN, \quad (11.65)$$

sehingga dapat kita simpulkan

$$\mu = \left(\frac{\partial G}{\partial N} \right)_{P,T}. \quad (11.66)$$

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, Mikrajuddin. 2007. *Pengantar Fisika Statistik untuk Mahasiswa*. Bandung: Program Studi Fisika- FMIPA Institut Teknologi Bandung.
- Abdullah, Mikrajuddin. 2017. *Mekanika Statistik*. Bandung: Penerbit Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB.
- Adriaans, Pieter, & van Benthem, Johan. 2008. *Philosophy of Information*. Amsterdam: Elsevier.
- Boas, Marie L. 2006. *Mathematical Methods in the Physical Sciences (Third Edition)*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Goldstein, H., Poole, C., & Safko, J. 2002. *Classical Mechanics (3rd Edition)*. Boston: Addison-Wesley.
- Griffiths, David J. 1995. *Introduction to Quantum Mechanics*. New Jersey: Prentice Hall.
- Hanlon, Robert T. 2020. *Block by Block: The Historical and Theoretical Foundations of Thermodynamics*. Oxford: Oxford University Press.
- Huang, Kerson. 2010. *Introduction to Statistical Physics (Second Edition)*. New York: CRC Press.
- Salinas, Silvio R. A. 2001. *Introduction to Statistical Physics*. New York: Springer.
- Sekerka, Robert F. 2015. *Thermal Physics: Thermodynamics and Statistical Mechanics for Scientists and Engineers*. Pittsburgh: Elsevier.

- Zemansky, Mark W., & Dittman, Richard H. 1997. *Heat and Thermodynamics (Seventh Edition)*. New York: McGraw-Hill.
- Duren, Peter. 2009. Changing Faces: The Mistaken Portrait of Legendre. *Notices of the AMS*, 56, 11, 1440 – 1443.
- International Organization for Standardization. 2019. *Quantities and units – Part 5: Thermodynamics*. ISO 80000-5:2019. Geneva: International Organization for Standardization.
- Keifer, David. 2019. Enthalpy and the Second Law of Thermodynamics. *J. Chem. Educ.*, 96, 1407–1411.
- Kok, C., Cellek, S., Kosun, C., & Ozdemir, S. 2016. Casting the Swarms Problem in Ensembles Context. *Int. Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016)*, 1 – 8.
- Lubarda, V. A. 2004. On thermodynamic potentials in linear thermoelasticity. *Int. J. Solids and Structures*, 41, 7377–7398.
- Pattersons, M. L., & Sulaksono, A. 2021. Mass correction and deformation of slowly rotating anisotropic neutron stars based on Hartle-Thorne formalism. *The European Physical Journal C*, 81, 698.
- Pitre, Laurent, Plimmer, Mark D., Sparasci, Fernando, & Himbert, Marc E. 2019. Determinations of the Boltzmann constant. *The new Int. System of Units.*, 20, 1–2, 129–139.
- Schaefer, B. A. 1970. Thermodynamic Potentials. *J. Chem. Educ.*, 47, 11, 745–748.

BIODATA PENULIS



Analekta Tiara Perdana, S.Si., M.Si.

Dosen UIN Sultan Maulana Hasanuddin Banten

Penulis lahir di Jakarta tanggal 27 Maret 1991. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Biologi, Fakultas Sains, UIN Sultan Maulana Hasanuddin Banten. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Al Azhar Indonesia dan S2 pada Program Studi Mikrobiologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, IPB University. Penulis menekuni bidang mikrobiologi pangan.

BIODATA PENULIS



Jannes Bastian Selly, S.Pd., M.Si., M.Kes.

Dosen Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Nusa Cendana

Penulis lahir di Kupang, Nusa Tenggara Timur, tanggal 04 Juni 1992. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada program studi Pendidikan Fisika, Universitas Nusa Cendana, tahun 2013. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan magister pada program studi magister Ilmu Fisika, dan mengambil peminatan Fisika Medis dan Biofisika, di Universitas Brawijaya, dan menyelesaikan pada 2015. Pada tahun 2017, penulis kembali menempuh pendidikan magister pada program studi magister Ilmu Kesehatan Masyarakat, dengan mengambil konsentrasi Kesehatan Lingkungan dan Keselamatan Kerja, di Universitas Nusa Cendana, dan menyelesaikannya dua tahun kemudian yaitu pada tahun 2019.

Pada Tahun 2016, penulis bekerja sebagai dosen di Universitas Citra Bangsa (sebelumnya merupakan STIKes Citra Husada Mandiri, yang kemudian beralih status menjadi universitas pada tahun 2019). Penulis mengampu mata kuliah Fisika Farmasi, Fisika Kesehatan, dan Biostatika pada

program studi Farmasi, Kebidanan, dan Keperawatan. Saat ini, penulis merupakan dosen tetap di Program Studi Pendidikan Fisika, FKIP Universitas Nusa Cendana, sejak tahun 2022.

Dalam memenuhi salah satu kegiatan dari tridharma perguruan tinggi, yaitu penelitian dan publikasi, penulis aktif dalam menulis buku. Hingga saat ini sudah ada dua buku yang telah dipublikasikan berISBN yaitu buku *Metodologi Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif*, serta buku Kesehatan Lingkungan dan Keselamatan Kesehatan Kerja. Buku ini merupakan *book chapter* ketiga yang penulis kerjakan. Semoga tulisan dalam buku ini dapat menambah pengetahuan dan dapat dijadikan sebagai referensi khususnya dalam bidang termodinamika.

BIODATA PENULIS



Erwin Randjawali, S.Pd., M.Si.

Dosen Program Studi Pendidikan Matematika
Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan
Universitas Kristen Wira Wacana Sumba

Penulis merupakan dosen tetap di Universitas Kristen Wira Wacana Sumba, dan ditempatkan pada Prodi Pendidikan Matematika. Penulis mengampu beberapa matakuliah diantaranya: Fisika Dasar, Kalkulus, Matematika Dasar, Pemrograman Komputer, dan lain-lain. Selain mengajar, penulis juga melakukan riset dengan topik di bidang fisika secara khusus pada bidang energi terbarukan dan pemodelan fisika, serta beberapa penelitian terkait pendidikan. Penulis juga aktif dalam menghasilkan publikasi dalam bentuk *book chapter*. Selain itu, penulis juga aktif mengimplementasikan keilmuan dalam bentuk pengabdian kepada masyarakat.

BIODATA PENULIS



Eka Sriwahyuni, S.Pd., M.Pd,

Dosen Institut Agama Islam Negeri Parepare

Penulis lahir di Rappang 28 Maret 1994 merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan Muzakri dan Hasnah. Penulis mengawali pendidikan di SDN 4 benteng selesai pada tahun 2006. Kemudian Melanjutkan pendidikan di MTs PPUW yang selesai pada tahun 2009, dan melanjutkan pendidikan di MA PPUW yang selesai pada tahun 2012.

Penulis menyelesaikan pendidikan Program Sarjana (S1) pada Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Tarbiyah dan Keguruan UIN Alauddin Makassar Tahun 2016, kemudian menyelesaikan Program Megister (S2) Pendidikan Fisika UNM Makassar Tahun 2020. Terhitung tahun 2021 penulis menjadi dosen tetap di Institut Agama Islam Negeri Parepare. Saat ini mengajar pada Program Studi Tadris IPA IAIN Parepare.

BIODATA PENULIS



Desy Nurhasanah Sari, S.Si., M.Si

Dosen Program Studi Kimia

Universitas Syekh Yusuf Al- Makassar Gowa

Penulis lahir di Palu, Sulawesi Tengah pada tanggal 11 Desember 1996. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Kimia, Universitas Syekh Yusuf Al-Makassar Gowa. Penulis Menyelesaikan pendidikan S1 Jurusan Kimia di Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar dan melanjutkan S2 Jurusan Kimia di Universitas Hasanuddin.

BIODATA PENULIS



Azmalaeni Rifkah Ansyarif, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Kimia

Universitas Syekh Yusuf Al Makassar Gowa

Penulis lahir di Ujung Pandang tanggal 18 Oktober 1996. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Kimia, Universitas Syekh Yusuf Al Makassar Gowa. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri (UIN) Alauddin Makassar dan melanjutkan S2 pada Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (MIPA), Universitas Hasanuddin. Penulis menekuni pada bidang menulis.

BIODATA PENULIS



Dr. Jan Setiawan, S.Si., M.Si.

Staf Dosen Prodi Teknik Elektro Universitas Pamulang
Staf Periset Badan Riset dan Inovasi Nasional

Penulis lahir di Jakarta pada tahun 1980. Saat ini penulis adalah staf Peneliti Ahli Madya pada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Penulis menyelesaikan studi S1 di prodi Fisika Institut Pertanian Bogor pada tahun 2003. Penulis melanjutkan studi S2 di prodi Ilmu Bahan-bahan Universitas Indonesia yang diselesaikan pada tahun 2010. Penulis menyelesaikan studi S3 pada tahun 2015 di prodi Ilmu Bahan-bahan Universitas Indonesia. Bidang kepakaran penelitian Penulis adalah teknik material. Selain berkarir sebagai peneliti Penulis juga aktif menjadi pengajar pada Program Studi Teknik Elektro - Universitas Pamulang. Penulis juga aktif menjadi mitra bestari untuk jurnal ilmiah baik nasional maupun internasional. Penulis mulai berkecimpung dalam penulisan buku untuk bidang MIPA dan keteknikan semenjak tahun 2020.

Email Penulis: jansetiawan.lecturer@gmail.com

BIODATA PENULIS



Fahmy Rinanda Saputri, S.T., M.Eng.

Dosen Program Studi Teknik Fisika
Fakultas Teknik dan Informatika Universitas Multimedia
Nusantara

Penulis lahir pada bulan Agustus 1993 di Cilacap. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Fisika Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Multimedia Nusantara. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada dan melanjutkan studi pada Program Magister Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada. Penulis menekuni bidang instrumentasi, fisika bangunan, dan energi baru terbarukan.

BIODATA PENULIS



Neny Rochyani

Dosen Program Studi Teknik Kimia
Fakultas Teknik Universitas PGRI Palembang

Penulis lahir di Palembang tanggal 09 Juni, menikah dengan Gonan Sumadi, dikaruniai 2 orang putra Ahmad Fadlan Abdullah latif Al-Ghozali (alm.) dan Muhammad Aufar Nurhasyim Ar-rambani. Menyelesaikan pendidikan S1, S2 pada Jurusan Teknik kimia dan melanjutkan S3 pada program studi ilmu-ilmu lingkungan dengan BKU : Agro Industri Energi di UNSRI-Palembang, pendidikan profesi keinsinyuran (Ir.) pada Unika Atmajaya Jakarta dan memegang registrasi sebagai Insinyur Profesional Madya (IPM) serta ASEAN Eng. Pada bidang penulisan karya ilmiah, sampai dengan saat ini telah menghasilkan karya ilmiah utamanya penelitian yang berhubungan dengan materi ilmu kimia dan lingkungan dengan kajian utama berfokus terhadap restorasi dan pendalaman karakteristik lingkungan yang menjadi kekuatan pengelolaan lingkungan. Dalam ranah penulisan buku, sampai dengan saat ini telah menghasilkan buku materi ajar dan modul paktikum yang dipakai dan diaplikasikan pada lingkungan perguruan tinggi.

BIODATA PENULIS



Alvin Dior Al Ghifari, S.Si.

Cambridge Mathematics and Physics Teacher for Secondary
and High School

AL-WILDAN 4 ISLAMIC SCHOOL JAKARTA

Penulis lahir di Jakarta pada 19 Juli 1995. Penulis merupakan pengajar tetap Matematika dan Fisika pada AL-WILDAN 4 ISLAMIC SCHOOL JAKARTA. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Prodi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi (FST), Universitas Islam Negeri (UIN) Syarif Hidayatullah Jakarta (2019). Di Prodi tersebut, penulis mengambil peminatan di bidang Fisika Material. Bidang penelitian sarjana penulis yaitu bidang nanomaterial *carbon quantum dots* (C-Dots). Penulis meneliti sifat optik dari nanomaterial tersebut saat magang di Kelompok Penelitian Laser, Pusat Penelitian Fisika LIPI (2017). Penulis dapat dihubungi melalui email berikut: alvindior@gmail.com.

BIODATA PENULIS



Muhammad Lawrence Pattersons, M.Si.

Mahasiswa Program Doktor Fisika, Institut Teknologi
Bandung

Penulis lahir di Jakarta, 15 Desember 1994. Penulis adalah mahasiswa pada Program Doktor Fisika ITB, di bawah bimbingan Prof. Freddy P. Zen, D.Sc.. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Fisika di Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, dan menyelesaikan studi S2 pada Jurusan Magister Ilmu Fisika (Peminatan Fisika Nuklir dan Partikel Teoritis) di Universitas Indonesia. Penulis memiliki *expertise* di bidang penelitian terkait bintang neutron anisotropis. Di antara karya ilmiah penulis adalah artikel yang berjudul *Mass correction and deformation of slowly rotating anisotropic neutron stars based on Hartle-Thorne formalism* yang dipublikasi oleh *The European Physical Journal C*. Karya-karya ilmiah penulis lainnya dapat di lihat melalui laman berikut:

<https://tinyurl.com/gscholarMLPattersons>. Penulis juga merupakan kontributor untuk rubrik Matematika pada *Majalah 1000guru*. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik berikut: muhammad.lawrence@ui.ac.id.