

Seri Buku
Kimia Fisika

GAS & TERMODINAMIKA

PROF. DR. MUKHAMAD NURHADI, M.Si

**SERI BUKU
KIMIA FISIKA**

GAS dan TERMODINAMIKA

Oleh:

PROF. DR. MUKHAMAD NURHADI, M.Si



**SERI BUKU
KIMIA FISIKA**

GAS dan TERMODINAMIKA

© 2021

Penulis

Prof. Dr. Mukhamad Nurhadi, M.Si

Desain Cover & Penata Isi

Tim MNC Publishing

Cetakan I, Mei 2021

Diterbitkan oleh :



Media Nusa Creative

Anggota IKAPI (162/JTI/2015)

Bukit Cemara Tidar H5 No. 34, Malang

Telp. : 0812.3334.0088

E-mail : mncpublishing.layout@gmail.com

Website : www.mncpublishing.com

ISBN 978-602-462-641-9

Hak Cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ke dalam bentuk apapun, secara elektronis maupun mekanis, termasuk fotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis dan/ atau Penerbit. Undang-Undang Nomor 19 Tahun 2000 tentang Hak Cipta, Bab XII Ketentuan Pidana, Pasal 72, Ayat (1), (2), dan (6)

PRAKATA

Buku ini disusun dalam rangka melengkapi buku buku ajar dalam Bahasa Indonesia. Kita menyadari bersama, bahwa buku yang menyajikan pokok bahasan Gas dan Termodinamika dalam bahasa asing sudah banyak jumlahnya, tetapi buku tersebut yang berbahasa Indonesia masih sangat terbatas.

Buku ini disusun untuk membantu Dosen dan Mahasiswa dalam mengajarkan dan mempelajari pokok bahasan Gas dan Termodinamika yang merupakan bagian dalam mata kuliah Kimia Fisika I. Di dalam buku ini disajikan penjabaran lengkap dan mendalam dari persamaan-persamaan matematika yang biasanya menjadi kendala besar bagi Dosen dan mahasiswa dalam memahami pokok bahasan Gas dan Termodinamika.

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada seluruh civitas akademik FKIP Universitas Mulawarman khususnya semua dosen dilingkungan Program Studi Pendidikan Kimia yang telah memberi doa dan dorongan untuk menyelesaikan buku ini. Kepada penerbit yang telah membantu penerbitan buku ini, tidak lupa diucapkan terima kasih.

Akhirnya kami mengharapkan kritik yang membangun dari para pengguna buku ini. Semoga buku ini merupakan sumbangan yang sangat bermanfaat bagi Dosen dan Mahasiswa di Indonesia.

Samarinda, April 2021

Mukhamad Nurhadi

DAFTAR ISI

Pengantar	iii
Daftar Isi	v
BAB I GAS	1
1.1. Keadaan Gas	1
1.1.1. Tekanan (P)	1
1.1.2. Temperatur (T)	2
1.1.3. Jumlah Gas (n)	3
1.1.4. Volume (V)	4
1.2. Hukum-Hukum Gas (Ideal)	4
1.2.1. Hukum Boyle	5
1.2.2. Hukum Charles	5
1.2.3. Hukum Gay-Lussac	6
1.2.4. Gabungan Hukum Gas	7
1.2.5. Hukum Avogadro	8
1.2.6. Hukum Dalton	10
1.2.7. Hukum Graham	13
1.3. Gas Nyata	14
1.3.1. Pengembunan	15
1.3.2. Persamaan Van der Waals	15
1.3.3. Volume kritis (V_c), Tekanan kritis (P_c) dan Temperatur kritis (T_c)	16
1.4. Asas Keadaan Yang Bersesuaian	22
Pustaka	25
Soal-soal	25
BAB II TERMODINAMIKA	27
2.1. Sistem dan Lingkungan	27
2.2. Energi, Kalor dan Kerja	27
2.3. Hukum Pertama Termodinamika	29
2.4. Kerja Mekanis	30
2.5. Kerja Pemampatan dan Pemuaian Gas	31

2.6. Kerja Pemuaian Gas Sempurna pada Suhu Tetap (<i>Isothermal</i>)	32
2.7. Kalor dan Entalpi	34
2.8. Kapasitas Panas	35
2.9. Percobaan Joule – Thomson	37
2.10. Jenis-jenis Perubahan Entalpi Standar	40
2.11. Pengukuran perubahan entalpi	45
2.11.1. Penentuan Perubahan Entalpi dari Reaksi yang Tidak Melibatkan Gas	45
2.11.2. Penentuan Perubahan Entalpi Reaksi yang Melibatkan Zat-zat Berfase Gas	46
2.11.3. Penentuan Kalor Reaksi Secara Eksperimen (Kalorimetri)	47
2.11.4. Penentuan Perubahan Entalpi dengan Menggunakan Hukum Hess	48
2.11.5. Penentuan Perubahan Entalpi Reaksi Menggunakan Data Entalpi Pembentukan Standar	50
2.11.6. Penentuan Perubahan Entalpi Reaksi Menggunakan Data Energi Ikatan	51
2.12. Kerja Adiabatik Gas Sempurna	53
2.13. Hubungan Antara Temperatur dan Energi Reaksi	56
2.14. Ketergantungan Perubahan Entalpi Suatu Reaksi Kimia	57
2.15. Entropi	60
2.15.1. Entropi Sistem	61
2.15.2. Entropi Lingkungan	61
2.15.3. Perubahan Entropi Untuk Sistem Terisolasi, pada Suhu Tetap (<i>isothermal</i>) dan Dapat Balik (<i>reversible</i>)	62
2.15.4. Perubahan Entropi untuk Sistem Terisolasi, pada Proses Suhu Tetap (<i>isothermal</i>) dan Tidak Dapat Balik (<i>irreversible</i>)	64
2.16. Hukum Kedua Termodinamika	65
2.17. Perubahan Entropi untuk Gas Sempurna	66
2.18. Perhitungan Perubahan Entropi	69

2.18.1. Proses yang Tidak Disertai Perubahan Fasa ..	69
2.18.2. Proses Dapat Balik (<i>reversible</i>) yang Disertai Perubahan Fasa	69
2.18.3. Proses Tidak Dapat Balik (<i>irreversible</i>) yang Disertai Perubahan Fasa	70
2.18.4. Perubahan Entropi pada Reaksi Kimia	71
2.19.Kebergantungan Entropi pada Temperatur	72
2.20.Hubungan Perubahan Entropi Dengan Temperatur pada Tekanan tetap	74
2.21.Entropi Absolut	76
2.22.Hubungan Perubahan Entropi dengan Temperatur pada Volume Tetap	78
2.23.Entropi Campuran Gas Sempurna	79
2.24.Perubahan Entropi Sebagai Indikator Kespontanan Reaksi	81
2.25.Perubahan Entropi sebagai Indikator Keseimbangan Reaksi	82
2.26.Hukum Ketiga Termodinamika	83
2.27.Fungsi Energi Bebas	83
2.27.1. Energi Bebas Helmholtz	83
2.27.2. Energi Bebas Gibbs	85
2.27.2.1. Hubungan Energi Bebas Gibbs dan Tekanan	86
2.27.2.2. Kebergantungan fungsi Gibbs pada Temperatur	88
2.27.2.3. Kebergantungan Fungsi Gibbs pada Entalpi	90
2.27.2.4. Perubahan Energi Bebas Gibbs Berdasarkan Energi Bebas Pembentukan Standar	91
2.28.Ringkasan Persamaan Termodinamika	92
2.29.Hubungan Maxwell	93
2.30.Aturan Siklis	94
Pustaka	97
Soal-soal	97

BAB 1

GAS

Banyak zat disekitar kita adalah gas. Gas adalah zat yang paling sederhana, yang memenuhi segala wadah yang ditempatinya. Gas dapat digambarkan sebagai kumpulan molekul-molekul dengan gerakan yang kacau balau, acak tetapi berkesinambungan, dengan kecepatan yang bertambah jika suhu dinaikan. Molekul-molekul gas terpisah jauh satu dengan yang lainnya, kecuali selama tabrakan, dan bergerak tak bergantung satu dengan yang lainnya.

1.1. Keadaan Gas

Ada empat variabel yang digunakan untuk mempelajari sifat-sifat dasar dari gas yaitu volume yang ditempati (V), jumlah zatnya (jumlah mol, n), tekanan (p) dan temperatur (T). Hubungan antara satu variabel dengan tiga variabel lainnya dapat dinyatakan melalui suatu *persamaan keadaan*.

1.1.1. Tekanan (P)

Tekanan pada suatu permukaan muncul karena adanya gaya yang bekerja pada permukaan itu. Makin besar gaya yang bekerja makin besar tekanan nya. Jadi tekanan adalah besarnya gaya per satuan luas. Tekanan memiliki beberapa satuan diantaranya newton per meter persegi (Nm^{-2}), pascal (Pa), atmosfer (atm), bar, torr (mmHg) dan pound per inci kuadrat. Satuan tekanan menurut SI adalah pascal (Pa). Satu pascal dapat didefinisikan sebagai tekanan yang diakibatkan oleh besaran gaya satu newton yang bekerja pada bidang luasan satu meter persegi. Sedangkan satu newton adalah

besarnya gaya yang diperlukan untuk memberikan percepatan satu meter per detik kuadrat pada benda bermassa satu kilogram. Hubungan antar satuan tekanan adalah sebagai berikut:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{m \times a}{A} \quad (1.1)$$

Satuan dari tekanan:

$$P = \text{Nm}^{-2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{m}^2} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \text{s}^{-2}$$

$$1 \text{ Pascal (Pa)} = 1 \text{Nm}^{-2}$$

$$1 \text{ atmosfer (1 atm)} = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa} = 101,3 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 76 \text{ cmHg} = 760 \text{ mmHg} = 760 \text{ Torr}$$

Contoh soal 1.1:

Nabila massanya 55 kg, hitunglah tekanan yang dilakukannya pada lantai jika memakai a) sepatu dengan sol yang luas nya 250 cm² bersentuhan dengan lantai.

Jawaban:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{m \times g}{A}$$

$$P = \frac{55 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m s}^{-2}}{2,50 \times 10^{-2} \text{ m}^2} = 215,82 \times 10^2 \text{ Pa} = 21,582 \text{ kPa}$$

Latihan 1.1:

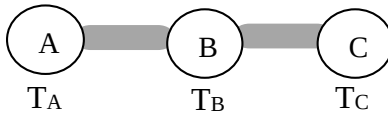
Ada tiga sistem A, B dan C diukur tekanannya berturut-turut 50 mmHg, 730 mmHg dan 800 mmHg. Hitunglah tekanan masing-masing sistem dalam satuan Pascal (Nm⁻²)

1.1.2. Temperatur (T)

Temperatur adalah sifat yang menunjukkan arah aliran energi. Jika energi mengalir dari A ke B, maka dapat dikatakan bahwa A mempunyai temperatur yang lebih tinggi daripada B. Jika tidak ada energi yang mengalir ketika A dan B bersentuhan, maka A

dan B mempunyai temperatur yang sama dan sudah mencapai keadaan **kesetimbangan termal**.

Hukum kesetimbangan suhu :



Misalnya A, B dan C berturut-turut mempunyai temperatur T_A , T_B dan T_C . Jika T_A sama dengan T_B dan T_B sama dengan T_C , maka dapat disimpulkan A, B dan C berada dalam keadaan kesetimbangan termal. Keadaan kesetimbangan termal antara A, B dan C disebut **Hukum Ke Nol termodinamika**.

Temperatur dinotasikan sebagai T dan dinyatakan dalam Kelvin (K). Hubungan antara temperatur dalam skala Celcius dengan lambang Θ dan skala Kelvin dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$T (K) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273,17 \quad (1.2)$$

Contoh soal 1.2:

Suatu ruangan kelas temperaturnya 18°C , nyatakanlah temperatur tersebut dalam Kelvin.

Jawaban:

$$T (K) = 18 + 273,17 = 291,17 \text{ K}$$

Latihan 1.2:

Seorang mahasiswa mengukur suhu tubuhnya dengan termometer menunjukkan $309,5 \text{ K}$, nyatakanlah temperatur tersebut dalam derajat Celcius.

1.1.3. Jumlah Gas (n)

Jumlah gas dilambangkan sebagai n menyatakan jumlah gas dalam satuan mol.

$$n = \frac{g}{M} \quad (1.3)$$

g = massa gas (g)

M= massa molar gas

Contoh soal 1.3:

Nyatakan 2,8 gram gas nitrogen (Ar N = 14) dalam mol.

Jawaban:

$$n = \frac{g}{M} = \frac{2.8 \text{ g}}{28 \text{ g/mol}} = 0,1 \text{ mol}$$

Latihan 1.3:

Nyatakan 8,0 gram gas metana (Ar C = 12, H = 1) dalam mol

1.1.4. Volume (V)

Zat yang dimasukkan dalam suatu wadah, molekul-molekulnya dapat bergerak bebas sehingga memenuhi wadah yang ditempatinya, zat tersebut adalah **Gas**. Volume gas adalah sama dengan volume wadah yang ditempati.

Satuan SI daripada volume adalah Liter dengan lambang L. Satuan Liter ini diabadikan dari nama seorang ahli yaitu Claude Emile Jean-Baptise Liter (1716-1778).

$$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 1000 \text{ cm}^3$$

1.2. Hukum-Hukum Gas (Ideal)

Persamaan keadaan gas sempurna adalah persamaan yang menghubungkan variabel-variabel tekanan (P), volume (V), temperatur (T) dan jumlah gas (n). Persamaan keadaan gas sempurna dapat dinyatakan:

$$P.V = n.R.T \quad (1.4)$$

R adalah konstanta gas yang nilainya sama untuk setiap gas. Nilai konstanta gas ($R = 8,314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1} = 1,987 \text{ kal K}^{-1}\text{mol}^{-1} = 0.08205 \text{ L atm K}^{-1}\text{mol}^{-1}$) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$R = \frac{PV}{nT} \quad (1.5)$$

1.2.1. Hukum Boyle

Ekperimen tentang gas yang dilakukan Robert Boyle (1662) dilakukan dengan jumlah gas (n) dan temperatur (T) tetap, maka hasil kali tekanan (P) dan volume (V) hasilnya konstan.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$\text{eksperimen 1 : } P_1 \cdot V_1 = n \cdot R \cdot T$$

$$\text{eksperimen 2 : } P_1 \cdot V_1 = n \cdot R \cdot T$$

Berdasarkan hasil eksperimen 1 dan 2, hukum Boyle dapat disimpulkan

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad (1.6)$$

Contoh soal 1.4:

Pada suhu 25°C dan tekanan $1,0 \text{ atm}$ suatu gas sebanyak $3,0 \text{ g}$ menempati volume $5,0 \text{ L}$. Berapa volume gas pada 25°C dan tekanan $2,5 \text{ atm}$.

Jawaban

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$1 \text{ atm} \cdot 5,0 \text{ L} = 2,5 \text{ atm} \cdot V_2$$

$$V_2 = \frac{1 \text{ atm} \cdot 5,0 \text{ L}}{2,5 \text{ atm}} = 2,0 \text{ L}$$

Latihan 1.4:

Pada suhu 25°C dan tekanan $0,75 \text{ atm}$ suatu gas sebanyak $3,0 \text{ g}$ menempati volume $11,2 \text{ L}$. Berapa tekanan gas pada 25°C agar volumenya menjadi $16,8 \text{ L}$.

1.2.2. Hukum Charles

Jacques Charles (1787) melakukan eksperimen gas yang dilakukan pada tekanan (P) dan jumlah gas (n) yang konstan, maka volume gas (V) akan meningkat seiring bertambahnya temperatur (T).

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$\text{Eksperimen 1: } P \cdot V_1 = n \cdot R \cdot T_1$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{n \cdot R}{P}$$

Eksperimen 2: $P \cdot V_2 = n \cdot R \cdot T_2$

$$\frac{V_2}{T_2} = \frac{n \cdot R}{P}$$

Berdasarkan hasil eksperimen 1 dan 2, hukum Charles dapat disimpulkan:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (1.7)$$

Contoh soal 1.5:

Pada tekanan 1,0 atm dan suhu 25 °C, suatu gas yang massanya 3 g menempati volume 2,5 L. Pada tekanan dan jumlah gas konstan, hitunglah volume gas jika gas tersebut dipanaskan sehingga suhu mencapai 35 °C.

Jawaban

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

$$V_2 = \frac{V_1}{T_1} \times T_2$$

$$V_2 = \frac{2,5 \text{ L}}{298 \text{ K}} \times 308 \text{ K} = 2,58 \text{ L}$$

Latihan 1.5:

Pada tekanan 1,0 atm dan suhu 0 °C, suatu gas yang massanya 5 g menempati volume 1,83 L. Pada tekanan dan jumlah gas konstan, hitunglah volume gas jika gas tersebut dipanaskan sehingga suhu mencapai 100 °C.

1.2.3. Hukum Gay-Lussac

Joseph Gay-Lussac melakukan eksperimen tentang gas pada volume (V) dan jumlah gas (n) yang tetap, maka bertambahnya tekanan (P) gas berbanding lurus dengan meningkatnya temperatur (T).

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Eksperimen 1: $P_1 \cdot V = n \cdot R \cdot T_1$

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{n \cdot R}{V}$$

Eksperimen 2: $P_2 \cdot V = n \cdot R \cdot T_2$

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{n \cdot R}{V}$$

Berdasarkan hasil eksperimen 1 dan 2, hukum Gay-Lussac dapat disimpulkan:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (1.8)$$

Contoh soal 1.6:

Gas nitrogen dipanaskan sampai 500 K didalam wadah bervolume tetap. Jika gas itu memasuki wadah pada tekanan 100 atm dan temperatur 300 K, berapa tekanan yang dilakukannya pada temperatur tinggi.

Jawaban

$$P_2 = \frac{P_1}{T_1} \times T_2$$

$$P_2 = \frac{100 \text{ atm}}{300 \text{ K}} \times 500 \text{ K} = 167 \text{ atm}$$

Latihan 1.6:

Berapa temperatur yang akan dihasilkan jika gas nitrogen pada tekanan 100 atm dan temperatur 300 K dimasukan dalam wadah yang bertekanan 300 atm.

1.2.4. Gabungan Hukum Gas

Gabungan hukum Boyle dan hukum Gay-Lussac dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Eksperimen Boyle-Gay-Lussac dilakukan pada jumlah zat (mol) yang konstan

Eksperimen 1: $P_1 \cdot V_1 = n \cdot R \cdot T_1$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = n \cdot R$$

Eksperimen 2: $P_2 \cdot V_2 = n \cdot R \cdot T_2$

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = n \cdot R$$

Pernyataan dalam bentuk lain:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1.9)$$

Contoh soal 1.7:

Pada suhu 0 °C tekanan 1 atm, volume suatu gas 0,25 L. Berapa volume gas ini jika diukur pada 1 atm dan temperatur 80 °C.

Jawaban

$$\begin{aligned} \frac{P_1 V_1}{T_1} &= \frac{P_2 V_2}{T_2} \\ V_2 &= \frac{P_1 V_1 T_2}{P_2 T_1} \end{aligned}$$

$$V_2 = \frac{1 \text{ atm} \cdot 0,25 \text{ L} \cdot 273 \text{ } ^\circ\text{C}}{1 \text{ atm} \cdot 350 \text{ } ^\circ\text{C}} = 0,195 \text{ L}$$

Latihan 1.7:

Pada tekanan 0,5 atm dan temperatur 27 °C volume suatu gas 500 mL. Hitunglah tekanan yang diperlukan untuk memampatkan gas ini menjadi 25 mL pada temperatur 0 °C.

1.2.5. Hukum Avogadro

Amendeo Avogadro menyatakan bahwa gas-gas yang volumenya sama diukur pada tekanan dan temperatur yang sama akan mempunyai jumlah partikel yang sama. Jadi dapat disimpulkan bahwa volume satu mol gas apapun adalah sama.

$$P V = n R T$$

$$\frac{n}{V} = \frac{P}{R T}$$

$$\text{Eksperimen 1: } \frac{n_1}{V_1} = \frac{P}{R \cdot T}$$

$$\text{Eksperimen 2: } \frac{n_2}{V_2} = \frac{P}{R \cdot T}$$

Berdasarkan eksperimen 1 dan 2 dapat dirumuskan:

$$\frac{n_1}{V_1} = \frac{n_2}{V_2} \quad (1.10)$$

Contoh soal 1.8:

2 mol gas nitrogen diukur pada 0 °C tekanan 2 atm volumenya 10 L. Pada suhu dan tekanan yang sama, tentukan volume 0,5 mol gas oksigen.

Jawaban

$$V_2 = \frac{V_1}{n_1} n_2 = \frac{10 \text{ L}}{2 \text{ mol}} 0,5 \text{ mol} = 2,5 \text{ L}$$

Latihan 1.8:

Berapa volume 1,4 g gas nitrogen (Ar N = 14) jika diukur pada keadaan yang sama 3,2 g gas oksigen (Ar O = 16) memiliki volume 10 L.

Volume Molar

Volume molar (V_m) suatu gas adalah volume yang ditempati per 1 mol molekul gas. Volume molar dihitung menurut persamaan:

$$V_m = \frac{R T}{P} \quad (1.11)$$

Volume molar ada dua jenis yaitu:

- 1) Volume 1 mol molekul gas yang diukur pada 0 °C, tekanan 1 atm (dikenal dengan temperatur dan tekanan standar (STP)) disebut volume molar STP (V_m STP).

$$V_m = \frac{R T}{P}$$
$$V_{m\text{STP}} = \frac{0.08205 \text{ L atm mol}^{-1} \text{K}^{-1} 273 \text{ K}}{1 \text{ atm}} = 22,414 \text{ Lmol}^{-1}$$

- 2) Volume 1 mol molekul gas yang diukur pada 25 °C, tekanan 1 atm (dikenal sebagai temperatur dan tekanan kamar standar (STAP)) disebut volume molar STAP (V_m STAP).

$$V_m = \frac{R T}{P}$$

$$V_{mSTP} = \frac{0.08205 \text{ L atm mol}^{-1} \text{K}^{-1} 298 \text{ K}}{1 \text{ atm}} = 24,790 \text{ Lmol}^{-1}$$

1.2.6. Hukum Dalton

Pada abad ke-19 John Dalton melakukan pengamatan pada campuran beberapa jenis gas dalam wadah yang sama. Hasil pengamatan menunjukkan tekanan total yang ditimbulkan oleh campuran gas merupakan jumlah tekanan yang ditimbulkan dari masing masing jenis gas tersebut yang menempati volume yang sama. Hukum Dalton dapat diilustrasikan dalam Gambar1.1:

$$P_{\text{Total}} = P_A + P_B + P_C + P_D \quad (1.12)$$

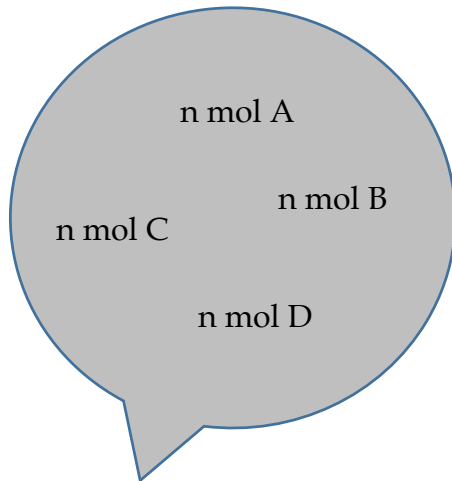
$$P_A = n_A \times \frac{RT}{V}$$

$$P_B = n_B \times \frac{RT}{V}$$

$$P_C = n_C \times \frac{RT}{V}$$

$$P_D = n_D \times \frac{RT}{V}$$

$$P_{\text{Total}} = (n_A + n_B + n_C + n_D) \frac{RT}{V} \quad (1.13)$$



Gambar 1.1 Campuran gas dalam suatu wadah

Contoh soal 1.9:

Dalam sebuah wadah volume = 10 L dicampurkan 1 mol gas nitrogen dan 3 mol gas hidrogen pada suhu 298 K. Tentukan tekanan campuran gas tersebut.

Jawaban:

$$P = (1+3) \text{ mol} \times \frac{0.08205 \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \times 298 \text{ K}}{10 \text{ L}} = 9,8 \text{ atm}$$

Latihan 1.9:

Dalam contoh 9 ditambahkan 1 mol N₂ dan 2 mol O₂ ke dalam wadah yang sama (dengan nitrogen dan hidrogen masih di dalamnya). Hitung tekanan total pada 298 K.

Fraksi mol dan tekanan parsial

Fraksi mol x_i dalam suatu campuran gas adalah jumlah mol dari komponen gas i (n_i) dibagi dengan jumlah mol total dari komponen-komponen gas (n_t) dalam campuran. Secara matematika fraksi mol dapat dinyatakan:

$$x_i = \frac{n_i}{n_t} \quad (1.14)$$

dengan $n_t = n_A + n_B + \dots$

Jumlah fraksi mol dalam campuran gas adalah hasil penjumlahan fraksi mol dari komponen-komponen penyusun campuran gas tersebut. Jumlah fraksi mol dalam campuran gas adalah sama dengan satu.

$$x_A + x_B + \dots = \sum_i x_i = 1 \quad (1.15)$$

Contoh soal 1.10:

Dalam wadah tertentu dicampurkan 1,0 mol gas oksigen, 2 mol gas nitrogen dan 3 mol gas hidrogen. Hitunglah fraksi mol masing-masing gas.

Jawaban

$$x_i = \frac{n_i}{n_t}$$

$$x_{O_2} = \frac{1}{1 + 2 + 3} = 0,167$$

$$x_{N_2} = \frac{2}{1+2+3} = 0,333$$

$$x_{H_2} = \frac{3}{1+2+3} = 0,500$$

Latihan 1.10:

Dalam wadah tertentu dicampurkan 2 mol gas ammonia, 3 mol karbondioksida dan 4 mol gas sulfur dioksida. Hitunglah fraksi mol masing-masing gas

Tekanan parsial (P_i) adalah tekanan masing-masing gas dalam campuran gas. Tekanan parsial suatu gas hanya bergantung pada jumlah fraksi mol gas (x_i) tersebut dan tekanan total campuran gas (P_t). Tekanan parsial tidak tergantung dari tekanan parsial gas lainnya dalam campuran gas.

$$P_i = x_i \cdot P_t \quad (1.16)$$

Contoh soal 1.11:

Dalam suatu wadah dicampurkan 1 mol gas nitrogen, 2 mol gas oksigen dan 5 mol gas hidrogen. Hitunglah tekanan parsial masing-masing gas jika tekanan total campuran gas tersebut 10 atm.

Jawaban

$$x_i = \frac{n_i}{n_t}$$

$$x_{N_2} = \frac{1}{1+2+5} = 0,125$$

$$x_{O_2} = \frac{2}{1+2+5} = 0,250$$

$$x_{H_2} = \frac{5}{1+2+5} = 0,625$$

Tekanan parsial masing-masing gas

$$P_i = x_i \cdot P_t$$

$$P_{N_2} = 0,125 \cdot 10 \text{ atm} = 1,25 \text{ atm}$$

$$P_{O_2} = 0,250 \cdot 10 \text{ atm} = 2,50 \text{ atm}$$

$$P_{H_2} = 0,625 \cdot 10 \text{ atm} = 6,25 \text{ atm}$$

Latihan 1.11:

Komposisi persentase massa udara kering pada ketinggian sama dengan permukaan air laut adalah 75,52; 23,15; 1,28 dan 0,046 untuk masing-masing gas nitrogen, oksigen, argon dan karbon dioksida. Hitung tekanan parsial masing-masing gas jika tekanan totalnya 10 atm.

1.2.7. Hukum Graham

Difusi gas adalah pergerakan suatu gas dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah sehingga terjadinya penyebaran molekul gas secara merata pada setiap bagian wadah. Efusi adalah peristiwa mengalirnya gas meliwati pori-pori yang kecil. Jika suatu campuran gas ditempatkan didalam wadah yang dindingnya berpori, maka molekul-molekul gas akan ber-efusi melalui dinding wadah. Pada tahun 1832 Thomas Graham melakukan pengamatan terhadap campuran gas dalam wadah yang dindingnya berpori. Berdasarkan hasil pengamatan beberapa eksperimen disimpulkan bahwa Laju efusi suatu gas berbanding terbalik dengan akar kuadrat kerapatannya atau akar kuadrat massa molarnya.

$$\frac{\text{laju efusi gas A}}{\text{Laju efusi gas B}} = \sqrt{\frac{\rho_B}{\rho_A}} = \sqrt{\frac{M_B}{M_A}} \quad (1.17)$$

dimana:

$$\begin{array}{ll} \rho_A = \text{kerapatan gas A} & M_A = \text{Massa molekul relatif gas A} \\ \rho_B = \text{kerapatan gas B} & M_B = \text{Massa molekul relatif gas B} \end{array}$$

Contoh soal 1.12:

Waktu yang diperlukan untuk gas A dan gas B ($M_r = 32$) dengan volume yang sama berefusi melalui dinding wadah berpori kecil berturut-turut 45 detik dan 48 detik. Tentukan massa molekul relatif A.

Jawaban

$$\frac{\text{laju efusi gas A}}{\text{Laju efusi gas B}} = \sqrt{\frac{M_B}{M_A}}$$

$$\frac{\frac{1}{t_A}}{\frac{1}{t_B}} = \sqrt{\frac{M_B}{M_A}}$$

$$\frac{t_B}{t_A} = \sqrt{\frac{M_B}{M_A}}$$

$$\frac{48 \text{ detik}}{45 \text{ detik}} = \sqrt{\frac{32}{M_A}}$$

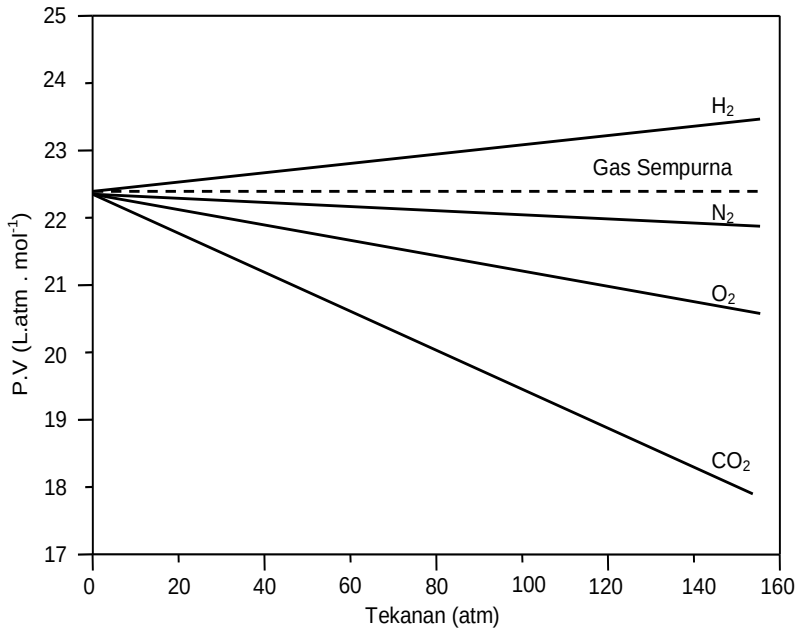
$$M_A = 32 \text{ g mol}^{-1} \left(\frac{45}{48}\right)^2 = 28 \text{ g mol}^{-1}$$

Latihan 1.12:

Volume gas oksigen dan gas B melakukan efusi dari suatu alat dalam tekanan, suhu dan waktu yang sama adalah berbanding sebagai 3 : 2. Tentukan massa molekul relatif gas B.

1.3. Gas Nyata

Gas yang mematuhi hukum Boyle adalah gas sempurna. Gas nyata atau gas tidak sempurna adalah gas yang tidak mematuhi hukum Boyle. Penyimpangan terhadap hukum Boyle terutama lebih terlihat pada tekanan tinggi dan temperatur rendah, khususnya pada saat gas akan mengembun. Pada semua tekanan hasil kali tekanan dan volume, $P.V$ adalah selalu konstan untuk gas sempurna. Pada suhu tertentu hasil kali tekanan dan volume ($P.V$) sebagai ordinat dialurkan terhadap tekanan sebagai absis akan dihasilkan garis datar seperti terlihat pada Gambar 1.2. Gambar 1.2 menunjukkan makin besar tekanan makin besar pula penyimpangan gas nyata terhadap gas sempurna. Pada limit tekanan nol atmosfer semua gas akan bersifat seperti gas sempurna karena pada tekanan tersebut semua gas memotong di ordinat $P.V$ pada 22,414 L.



Gambar 1.2 P.V sebagai fungsi tekanan pada 0 °C

1.3.1. Pengembunan

Volume suatu gas apabila dimampatkan pada temperatur tetap, setelah sampai volume dan tekanan tertentu akan terjadi perubahan fasa dari gas ke cair yang dikenal dengan peristiwa pengembunan. Jika pemampatan terjadi pada temperatur kritis (T_c) maka tekanan dan volume molar yang terjadi disebut tekanan kritis (P_c) dan volume molar kritis (V_c).

1.3.2. Persamaan Van der Waals

Johanes van der Waals tahun 1873 mengajukan persamaan keadaan dengan memasukan nilai khusus koefisien-koefisiennya berdasarkan bukti eksperimen yang dimilikinya dengan termodinamika yang logis. Persamaan keadaan gas menurut van der Waals dirumuskan seperti:

$$P = \frac{nRT}{(V - nb)} - a \left(\frac{n}{V} \right)^2 \quad (1.18)$$

Persamaan keadaan gas van der Waals dapat ditata ulang seperti menyerupai persamaan gas sempurna $PV=nRT$:

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V-nb) = nRT \quad (1.19)$$

nb menyatakan perkiraan volume total yang ditempati molekul-molekul gas, $-\left(\frac{n}{V}\right)^2$ adalah nilai pengurangan tekanan dan a menyatakan konstanta yang khas untuk setiap gas. Jika $n = 1\text{mol}$, maka $\left(\frac{n}{V}\right)^2 = \frac{1}{V_m^2}$, sehingga persamaan keadaan gas van der Waals berubah menjadi:

$$P = \frac{RT}{(V_m - b)} - \frac{a}{V_m^2} \quad (1.20)$$

dengan $\frac{a}{V_m^2}$ disebut tekanan internal gas.

1.3.3. Volume kritis (V_c), tekanan kritis (P_c) dan temperatur kritis (T_c)

Volume kritis merupakan titik puncak suatu kurva, sedangkan syarat titik puncak suatu fungsi adalah nilai turunan pertama dan kedua dari fungsi tersebut sama dengan nol.

$$P = \frac{RT}{(V_m - b)} - \frac{a}{V_m^2}$$

$$P = RT (V_m - b)^{-1} - \frac{a}{V_m^2}$$

Turunan pertama:

$$\frac{\partial P}{\partial V_m} = -RT (V_m - b)^{-2} + 2aV_m^{-3}$$

Turunan kedua:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial V_m^2} = 2RT (V_m - b)^{-3} - 6aV_m^{-4}$$

Karena syarat titik puncak suatu fungsi adalah harga turunan pertama dan kedua berharga sama dengan nol maka:

$$-\frac{RT}{(V_c - b)^2} + \frac{2a}{V_c^3} = 0$$

$$\frac{RT}{(V_c - b)^2} = \frac{2a}{V_c^3}$$

$$RT = \frac{2a}{V_c^3} (V_c - b)^2$$

Kemudian disubstitusi kedalam persamaan:

$$\frac{2RT}{(V_c - b)^3} - \frac{6a}{V_c^4} = 0$$

$$\frac{2 \frac{2a}{V_c^3} (V_c - b)^2}{(V_c - b)^3} - \frac{6a}{V_c^4} = 0$$

$$\frac{4a}{V_c^3} (V_c - b)^{-1} = \frac{6a}{V_c^4}$$

$$\frac{4a}{V_c^3(V_c - b)} = \frac{6a}{V_c^4}$$

$$4a = \frac{6a V_c^3 (V_c - b)}{V_c^4}$$

$$4V_c = 6(V_c - b)$$

$$4V_c - 6V_c = -6b$$

$$V_c = 3b$$

(1.21)

Menentukan T_c

$$\frac{-RT}{(V_c - b)^2} + \frac{2a}{V_c^3} = 0$$

$$-RT = \frac{-2a}{V_c^3} (V_c - b)^2$$

$$RT = \frac{2a}{V_c^3} (V_c - b)^2$$

$$RT_c = \frac{2a}{V_c^3} (V_c - b)^2$$

$$RT_c = \frac{2a}{(3b)^3} (3b - b)^2$$

$$RT_c = \frac{2a}{27b^3} (2b)^2$$

$$RT_c = \frac{2a}{27b^3} 4b^2$$

$$RT_c = \frac{8a}{27b}$$

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

(1.22)

Menentukan tekanan kritis (P_c)

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

$$P_c = \frac{RT_c}{V_c - b} - \frac{a}{V_c^2}$$

$$P_c = \frac{R \left(\frac{8a}{27bR} \right)}{3b - b} - \frac{a}{(3b)^2}$$

$$P_c = \frac{\frac{8a}{27b}}{2b} - \frac{a}{9b^2}$$

$$P_c = \frac{8a}{54b^2} - \frac{a}{9b^2}$$

$$P_c = \frac{8a}{54b^2} - \frac{5a}{54b^2}$$

$$P_c = \frac{2a}{54b^2}$$

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

(1.23)

Contoh soal 1.13:

Persamaan Barthelot adalah:

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

Buktikan bahwa $V_c = 3b$, $P_c = \frac{1}{12} \left(\frac{2aR}{3b^3} \right)^{1/2}$ dan $T_c = \frac{2}{3} \left(\frac{2a}{3bR} \right)^{1/2}$

Jawaban:

$$\begin{aligned} P &= RT(V_m - b)^{-1} - \frac{a}{T} V_m^{-2} \\ \frac{\partial P}{\partial V_m} &= -RT(V_m - b)^{-2} + \frac{2a}{T} V_m^{-3} \\ \frac{\partial P}{\partial V_m} &= -\frac{RT}{(V_m - b)^2} + \frac{2a}{TV_m^3} \\ \frac{\partial^2 P}{\partial V_m^2} &= 2RT(V_m - b)^{-3} - \frac{6a}{T} V_m^{-4} \\ \frac{\partial^2 P}{\partial V_m^2} &= \frac{2RT}{(V_m - b)^3} - \frac{6a}{TV_m^4} \end{aligned}$$

Karena syarat titik puncak suatu fungsi adalah harga turunan pertama dan kedua berharga sama dengan nol maka:

$$-\frac{RT}{(V_m - b)^2} + \frac{a}{TV_m^3} = 0$$

$$RT = \frac{2a}{TV_m^3} (V_m - b)^2$$

$$\frac{2RT}{(V_m - b)^3} - \frac{6a}{TV_m^4} = 0$$

Menentukan V_c

$$\frac{2 \left(\frac{2a}{TV_c^3} (V_c - b)^2 \right)}{(V_c - b)^3} = \frac{6a}{TV_c^4}$$

$$\frac{\frac{4a}{TV_c^3} (V_c - b)^2}{(V_c - b)^3} = \frac{6a}{TV_c^4}$$

$$\frac{4a}{(V_c - b)} = \frac{6a}{V_c}$$

$$4V_c = 6V_c - 6b$$

$$2V_c = 6b$$

$$V_c = 3b$$

Menentukan T_c

$$-\frac{RT}{(V_c - b)^2} + \frac{a}{TV_c^3} = 0$$

$$\frac{-RT_c}{(3b - b)^2} + \frac{a}{T(3b)^3} = 0$$

$$\frac{-RT_c}{(2b)^2} = \frac{-2a}{T_c 27b^3}$$

$$\frac{RT_c}{4b^2} = \frac{2a}{T_c 27b^3}$$

$$RT_c \cdot T_c 27b^3 = 2a \cdot 4b^2$$

$$RT_c^2 27b^3 = 8ab^2$$

$$RT_c^2 27b = 8a$$

$$T_c^2 = \frac{8a}{27Rb}$$

$$T_c = \sqrt{\frac{8a}{27Rb}}$$

$$T_c = \sqrt{\frac{4.2a}{9.3Rb}}$$

$$T_c = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2a}{3Rb}}$$

$$T_c = \frac{2}{3} \left(\frac{2a}{3Rb} \right)^{1/2}$$

Menentukan P_c

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

$$P_c = \frac{RT_c}{V_c - b} - \frac{a}{TV_c^2}$$

$$P_c = \frac{R \left(\frac{2}{3} \left(\frac{2a}{3Rb} \right)^{1/2} \right)}{3b - b} - \frac{a}{\frac{2}{3} \left(\frac{2a}{3Rb} \right)^{1/2} (3b)^2}$$

$$P_c = \frac{R \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2a}{3Rb}}}{2b} - \frac{a}{\frac{2}{3} \sqrt{\frac{2a}{3Rb}} 9b^2}$$

$$P_c = \frac{R \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2a}{3Rb}} \cdot \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2a}{3Rb}} 9b^2}{2b \cdot \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2a}{3Rb}} 9b^2} - \frac{2ab}{2b \cdot \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2a}{3Rb}} 9b^2}$$

$$P_c = \frac{R \frac{4}{9} \left(\frac{2a}{3Rb} \right) 9b^2 - 2ab}{2b \cdot \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2a}{3Rb}} 9b^2}$$

$$P_c = \frac{\frac{8ab}{3} - 2ab}{12b^3 \sqrt{2a/3Rb}}$$

$$\begin{aligned}
P_c &= \frac{\frac{2ab}{3}}{12b^3 \sqrt{2a/3Rb}} \\
P_c &= \frac{a}{18b^2 \sqrt{2a/3Rb}} \\
P_c &= \frac{a}{18b^2 \sqrt{2a/3Rb}} \times \frac{\sqrt{2a/3Rb}}{\sqrt{2a/3Rb}} \\
P_c &= \frac{a \cdot \sqrt{2a/3Rb}}{18b^2 \left(\frac{2a}{3Rb} \right)} \\
P_c &= \frac{a \cdot \sqrt{2a/3Rb}}{6b^2 \left(\frac{2a}{Rb} \right)} \\
P_c &= \frac{a \cdot \sqrt{2a/3Rb}}{\frac{12ab}{R}} \\
P_c &= \frac{1}{12} \cdot \frac{\sqrt{2a/3Rb}}{\sqrt{b^2/R^2}} \\
P_c &= \frac{1}{12} \sqrt{\frac{2a}{3Rb} \times \frac{R^2}{b^2}} \\
P_c &= \frac{1}{12} \sqrt{\frac{2aR}{3b^3}} \\
P_c &= \frac{1}{12} \left(\frac{2aR}{3b^3} \right)^{1/2}
\end{aligned}$$

Latihan1.13:

Persamaan Dieterici adalah:

$$P = \frac{RT e^{-a/RTV_m}}{(V_m - b)}$$

Buktikan bahwa $V_c = 2b$, $P_c = \frac{a}{4e^2b^2}$ dan $T_c = \frac{a}{4Rb}$

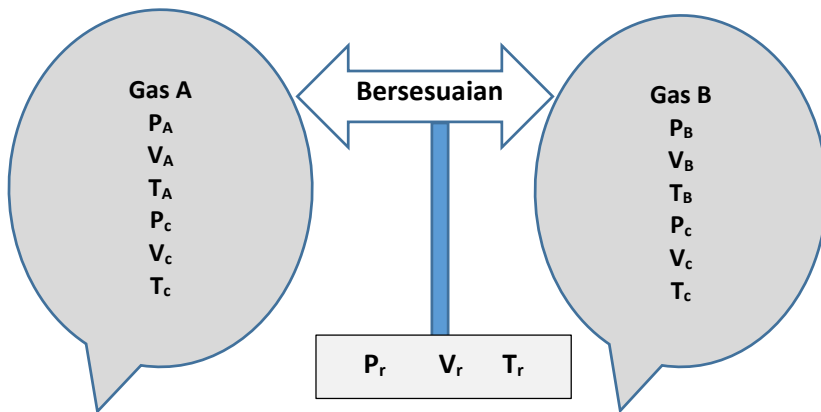
Tabel 1.1 Konstanta kritis

Sampel	P _c (atm)	V _c (cm ³ /mol)	T _c (K)
Ar	48	75,25	150,72
CO ₂	72,85	94,0	304,2
He	2,26	57,76	5,21
N ₂	33,54	90,10	126,3
C ₂ H ₄	50,50	124	283,1
C ₂ H ₆	48,20	148	305,4
C ₆ H ₆	48,6	260	562,7
CH ₄	45,6	98,7	190,6
Cl ₂	76,1	124	417,2
F ₂	55	144	
H ₂	12,8	64,99	33,23
H ₂ O	218,3	55,3	55,3
HBr	84,0	363,0	
HCl	81,5	81,0	324,7
HI	80,8	423,2	
Kr	54,27	92,24	209,39
Ne	26,86	41,74	44,44
NH ₃	111,3	72,5	405,5
O ₂	50,14	78,0	154,8
Xe	58,0	118,8	289,75

1.4. Asas Keadaan Yang Bersesuaian

Setiap gas memiliki parameter tekanan (P), volume (V), temperatur (T) dan jumlah zat (n). Setiap gas juga memiliki sifat khusus berupa konstanta kritis yaitu tekanan kritis (P_c), volume kritis (V_c) dan temperatur kritis (T_c). Dua gas atau lebih bisa dikatakan

berada dalam keadaan bersesuaian jika memiliki variabel tereduksi yaitu tekanan tereduksi (P_r), volume tereduksi (V_r) dan temperatur tereduksi (T_r) sama. Variabel tereduksi adalah perbandingan variabel yang sebenarnya dengan konstanta kritis yang sesuai. Tekanan tereduksi adalah hasil perbandingan antara tekanan gas dengan tekanan kritis gas. Volume tereduksi adalah perbandingan antara volume gas dengan volume kritis gas. Temperatur tereduksi adalah perbandingan temperatur gas dengan temperatur kritis gas. Tekanan tereduksi, volume tereduksi dan temperatur tereduksi dapat ilustrasikan sebagai berikut:



Gambar 1.3 Ilustrasi keadaan bersesuaian antara dua jenis gas

Tekanan tereduksi (P_r), volume tereduksi (V_r) dan temperatur tereduksi (T_r) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad (1.24)$$

$$V_r = \frac{V}{V_c} \quad (1.25)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (1.26)$$

Contoh 1.14:

Pada temperatur 280 K gas argon memiliki tekanan 10 atm dan volume $17,2 \text{ L mol}^{-1}$. Jika tekanan kritis, volume kritis dan temperatur

kritis dari gas argon berturut-turut adalah 48 atm, 75,3 mL dan 150,7 K, hitung tekanan tereduksi, volume tereduksi dan temperatur tereduksi dari gas argon.

Jawaban:

$$V_r = \frac{V}{V_c} = \frac{17,2 \text{ L/mol}}{75,3 \text{ mL}} = \frac{17200 \text{ mL}}{75,3 \text{ mL}} = 228,4$$

$$P_r = \frac{P}{P_c} = \frac{10 \text{ atm}}{48 \text{ atm}} = 0,2083$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} = \frac{280 \text{ K}}{150,7 \text{ K}} = 1,858$$

Latihan 1.14:

Sampel helium dengan volume molar 10,5 L dipertahankan pada 0,10 atm dan 10,0 K. Pada volume molar, tekanan dan temperatur berapa sampel gas CO₂ berada dalam keadaan bersesuaian. Data konstanta kritis dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Hubungan tekanan tereduksi dan tekanan kritis pada persamaan van der Waals untuk menjelaskan asas keadaan yang bersesuaian.

$$P_r = \frac{P}{P_c}$$

$$P_r \cdot P_c = P$$

Karena persamaan van der Waals

$$P = \frac{R \cdot T}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2}$$

$$P_r \cdot P_c = \frac{R \cdot T}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2}$$

$$P_r \cdot P_c = \frac{R \cdot T_r T_c}{V_r V_c - b} - \frac{a}{V_r^2 V_c^2}$$

Karena $P_c = \frac{a}{27b^2}$, $V_c = 3b$ dan $T_c = \frac{8a}{27bR}$, maka:

$$P_r \cdot \frac{a}{27b^2} = \frac{R \cdot T_r \frac{8a}{27bR}}{V_r 3b - b} - \frac{a}{V_r^2 (3b)^2}$$

$$P_r = \frac{R \cdot T_r \frac{8a}{27bR} \cdot \frac{27b^2}{a}}{V_r 3b - b} - \frac{a}{V_r^2 (3b)^2} \frac{27b^2}{a}$$

$$P_r = \frac{8 \cdot T_r}{3V_r - 1} - \frac{3}{V_r^2} \quad (1.27)$$

PUSTAKA

- ATKINS, P. W. (1990). Physical Chemistry. Oxford New York Toronto, OXFORD UNIVERSITY PRESS.
- BOAS, M. L. (1983). Mathematical Methods In The Physical Sciences. New York, John Wiley & Son.
- DOGRA, S. K. and S. DOGRA (1990). Kimia Fisik dan Soal-soal. Salemba 4, Jakarta 10430, Universitas Indonesia (UI-Press).
- Smith, E. B. (1982). Basic Chemical Thermodynamics. New York, Oxford University Press.
- Sukardjo, D. (1989). KIMIA FISIKA. Jakarta, PT. BINA AKSARA

SOAL-SOAL

1. Suatu gas didinginkan hingga suhu 0 K, berapa suhu gas tersebut dalam skala Celcius?
2. Titik didih gas oksigen (O_2) adalah 90,1 K, berapa harga suhu titik didih gas oksigen dalam Celcius?
3. Tekanan gas dalam tabung terbaca 40 cm Hg, tentukan tekanan gas tersebut dalam Pascal
4. Hitung tinggi etil alcohol yang akan mempunyai tekanan yang sama dengan 2 mm Hg. ρ (Hg) = 13,6 kg dm⁻³ dan ρ (C₂H₅OH) = 0,7983 kg dm⁻³
5. Pada suhu 20 °C sejumlah gas N₂ menempati ruangan 200 cm³ pada tekanan 50 mm Hg, berapakah tekanan gas tersebut apabila gas dalam jumlah yang sama berada dalam suatu bejana 60 cm³ pada temperatur yang sama.
6. 5 g gas mempunyai tekanan 200 mm Hg dalam wadah tertentu pada 25 °C. Jika 12 g gas yang sama ditambahkan ke dalam wadah tersebut, berapakah perubahan temperatur yang akan terjadi agar tekanannya sama?
7. Suatu silinder berisi N₂ yang terkompresi pada tekanan 120 atm dan temperatur 20 °C apabila dibuka tutupnya, N₂ akan

- menempati suatu ruang dengan volume 200 dm^3 pada 20°C dan 1 atm . Berapa volume silinder?
8. Sebuah botol 1 dm^3 , ketika kosong beratnya $65,05 \text{ g}$. Botol diisi gas dengan bobot molekul 48 g mol^{-1} pada tekanan 760 mm Hg dan temperatur 27°C . Hitung berat botol sekarang.
 9. 4 g gas A bila dimasukkan ke dalam wadah pada 25°C mempunyai tekanan $0,85 \text{ atm}$. Ke dalam wadah yang sama ditambahkan 6 g gas B, dan tekanan naik menjadi $1,30 \text{ atm}$ pada 25°C . Bila bobot molekul A adalah 40 g mol^{-1} , hitung bobot molekul B.
 10. Sebuah bejana 1 dm^3 dikosongkan dan ditutup. Setelah 2 jam, tekanan dalam bejana adalah $0,04 \text{ atm}$. Ini membuktikan bahwa terdapat lubang kecil pada bejana dimana udara masuk. Hitung diameter lubang tersebut dengan data berikut: M (bobot molekul udara) = 29 g mol^{-1} ; $p = 1 \text{ atm}$; $T = 300 \text{ K}$.
 11. Sebuah tabung dengan volume $22,4 \text{ L}$ berisi $2,0 \text{ mol H}_2$ dan $1,0 \text{ mol N}_2$ pada $273,15 \text{ K}$. Hitung; a) fraksi mol setiap komponennya, b) Tekanan parsialnya dan c) Tekanan totalnya
 12. Konstanta kritis metana adalah $p_c = 45,6 \text{ atm}$, $V_c = 98,7 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ dan $T_c = 190,6 \text{ K}$. Hitung parameter van der Waals.

TERMODINAMIKA

2.1. Sistem dan Lingkungan

Sistem adalah bagian dari dunia yang menjadi perhatian khusus dunia kita. Contoh sistem diantaranya: tabung reaksi, mesin, sel elektrokimia, termos, dan sebagainya. Segala sesuatu diluar sistem disebut lingkungan. Berdasarkan perpindahan materi dan energi antara sistem dan lingkungan, sistem dapat dibedakan menjadi: (a) Sistem terbuka adalah bila materi dan energi dapat dipertukarkan dari sistem ke lingkungan atau sebaliknya. Contoh: sejumlah zat dalam wadah terbuka. (b) Sistem tertutup adalah materi tidak dapat dipertukarkan tetapi energi dapat dipertukarkan dari sistem ke lingkungan atau sebaliknya. Contoh: sejumlah zat dalam wadah tertutup. (c) Sistem terisolasi adalah dimana materi maupun energi tidak dapat dipertukarkan dari sistem ke lingkungan atau sebaliknya. Contoh: botol termos yang ideal. (d) Sistem adiabatik adalah sistem terisolasi yang dapat mempertukarkan kerja dari sistem ke lingkungan atau sebaliknya. Contoh: labu Dewar.

2.2. Energi, Kalor dan Kerja

Parameter yang menentukan keadaan sistem meliputi suhu, tekanan, volume, massa, kerapatan dan konsentrasi. Fungsi keadaan atau sifat keadaan adalah nilai setiap besaran atau variabel yang hanya tergantung pada keadaan sistem dan tidak bergantung pada bagaimana keadaan itu tercapai. Sifat keadaan ada dua yaitu sifat ekstensif dan sifat intensif. Sifat ekstensif adalah nilai sifat keadaan yang bergantung pada ukuran (luas) sistem. Contoh sifat ekstensif: massa, volume, energi, entropi, dan seterusnya. Sifat intensif adalah

nilai sifat keadaan yang tidak bergantung pada ukuran sistem. Contoh sifat intensif: tekanan, suhu, massa jenis/kepadatan, volume molar, dan energi.

Energi adalah kapasitas sistem untuk melakukan kerja. Energi total atau keseluruhan energi potensial dan energi kinetik zat-zat yang terdapat dalam suatu sistem disebut energi dalam (U atau E). Nilai mutlak energi sistem tidak dapat diketahui, tetapi dalam termodinamika yang dapat dilihat adalah perubahan pada energi dalam (ΔU atau ΔE).

$$\Delta U = U_f - U_i \quad (2.1)$$

Perubahan energi dalam yang sangat kecil maka notasi ΔU dapat dituliskan sebagai bentuk diferensial dU atau ∂U .

Kalor (q) adalah perubahan energi sistem yang disebabkan adanya pemindahan energi melalui batas-batas sistem, sebagai akibat adanya perbedaan temperatur sistem dan temperatur lingkungannya. Sesuai kesepakatan q berharga positif jika sistem menerima kalor, dan q berharga negatif jika sistem mengeluarkan kalor. Batas sistem atau dinding sistem yang tidak dapat memungkinkan terjadinya perpindahan kalor disebut adiabatik. Contoh wadah adiabatik yang baik adalah labu Dewar. Batas sistem yang dapat memungkinkan terjadinya perpindahan kalor disebut diatermik. Baja dan kaca adalah sebagian contoh bahan yang tergolong diatermik. Ada dua jenis proses berdasarkan perpindahan kalornya yaitu proses eksoterm dan proses endoterm. Proses eksoterm adalah proses pelepasan kalor dari sistem ke lingkungan, sebagai contoh semua reaksi pembakaran. Proses endoterm adalah proses penyerapan kalor dari lingkungan ke sistem, sebagai contoh penguapan air. Dalam wadah adiabatik proses eksoterm disertai kenaikan temperatur lingkungannya, sebaliknya proses endoterm disertai penurunan temperatur lingkungannya. Harga kalor (q) hanya dipengaruhi oleh jenis proses jadi kalor bukan merupakan fungsi keadaan. Perubahan kalor dapat dinotasikan sebagai Δw , dw dan ∂w .

Kerja (w) adalah semua bentuk energi bukan kalor yang dipertukarkan antara sistem dan lingkungan. Sebagai kesepakatan w

berharga positif apabila sistem menerima kerja dari lingkungan, sebaliknya w berharga negatif jika sistem melakukan kerja kepada lingkungan. Seperti halnya kalor, harga kerja juga hanya dipengaruhi oleh jenis proses sehingga kerja juga bukan fungsi keadaan.

2.3. Hukum Pertama Termodinamika

Energi total suatu sistem dikenal sebagai energi dalam (U). Energi dalam suatu sistem tidak mungkin diketahui harganya, yang dapat dihitung dalam termodinamika adalah perubahan pada energi dalam (ΔU). Energi dalam suatu sistem yang tertutup besarnya adalah tetap, tetapi energi dapat diubah dari suatu bentuk ke bentuk yang lain tetapi kita sendiri tidak dapat menciptakannya dan menghilangkannya. Hukum ini ditemukan oleh Mayer (1842) dikenal dengan Hukum Kekekalan Energi atau Hukum Pertama Termodinamika. Hukum pertama termodinamika dapat dinyatakan:

$$\Delta U = q + w \quad (2.2)$$

Untuk perubahan energi dalam yang sangat kecil akan berlaku:

$$\partial U = \partial q + \partial w \quad (2.3)$$

Contoh soal 2.1:

Sebuah motor listrik menghasilkan 15 kJ energi setiap detik sebagai kerja mekanik dan kehilangan 2 kJ sebagai panas pada lingkungannya. Hitunglah perubahan energi dalam motor?

Jawaban:

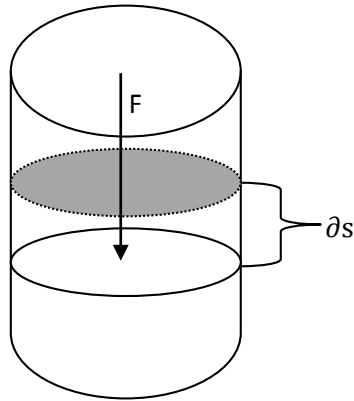
$$\Delta U = q + w$$

$$\Delta U = -2 \text{ kJ} + (-15 \text{ kJ}) = -17 \text{ kJ}$$

Latihan 2.1:

Jika sebuah pegas diputar, padanya dikenai kerja 100 J, tetapi pegas tersebut melepaskan 15 kJ dalam bentuk kalor ke lingkungannya. Hitunglah perubahan energi dalam pegas?

2.4. Kerja Mekanis



Gambar 2.1 Ilustrasi kerja mekanis

Dalam fisika besarnya kerja yang dilakukan untuk memindahkan objek sejauh ∂s melawan gaya yang menentanginya F , selanjutnya dapat dirumuskan:

$$\partial w = - F \partial s$$

Kerja total yang dilakukan jika sistem memindahkan objek dari jarak awal s_i sampai jarak akhir s_f dapat dihitung dengan mengintegral persamaan diatas.

$$\int \partial w = \int_{s_i}^{s_f} - F \partial s$$

$$w = - \int_{s_i}^{s_f} F \partial s$$

Jika F bukan fungsi jarak maka hasil integral menjadi:

$$w = - F (s_f - s_i) \quad (2.4)$$

Jika F adalah merupakan gaya berat bahan bermassa m , dengan percepatan gravitasi g ($9,81 \text{ ms}^{-2}$) maka $F = m g$. Kerja yang dilakukan sistem yang mengangkat bahan bermassa m meliwati ketinggian $h = s_f - s_i$ adalah:

$$w = - m g h \quad (2.5)$$

Contoh soal 2.2:

Hitung kerja yang dilakukan jika sistem menaikan buku bermassa 1,5 kg setinggi 10 cm.

Jawaban:

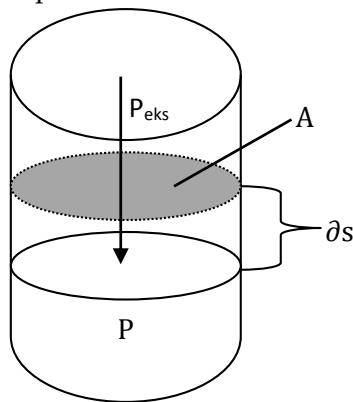
$$w = - m g h$$
$$w = -1,5 \text{ kg } 9,81 \text{ m s}^{-2} 0,1 \text{ m} = -1,4715 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} = -1,4715 \text{ J}$$

Latihan 2.2:

Hitung kerja yang dilakukan jika sistem dongkrak untuk menaikkan mobil bermassa 1 ton setinggi 20 cm.

2.5. Kerja Pemampatan dan Pemuaian Gas

Kalau volume suatu gas bertambah maka gas akan mendesak sekelilingnya dan gas tersebut akan melakukan kerja. Tetapi sebaliknya bila zat cair diletakkan dalam suatu silinder yang dilengkapi dengan tutup yang tidak memiliki berat dan tidak memiliki gesekan. Silinder ini diletakkan dalam reservoir sumber panas pada titik didihnya. Tekanan uap zat cair pada temperatur ini tetap sama dengan 1 atm dan seluruh sistem ada dalam keadaan keseimbangan bila temperatur daripada reservoir bertambah maka tekanan uap zat cair akan bertambah pula dan tutupnya akan terdorong, oleh karena volume uap akan bertambah besar sehingga tekanan dalam silinder akan konstan. Ilustrasi kerja pemampatan dan pemuaian gas dapat dilihat di Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Penghisap silinder dengan luas A bergerak keluar dengan jarak ∂s

Sedangkan kerja yang dilakukan oleh sistem adalah tekanan luar (P) kali perubahan volume uap zat cair dapat dituliskan:

$$\partial w = - P_{\text{eks}} \cdot A \cdot \partial s$$

$$\partial w = - P_{\text{eks}} \cdot \partial V \quad (2.6)$$

Sistem gas bertekanan P dalam silinder yang dilengkapi dengan penutup tidak bermassa dan tidak memiliki gesekan seluas A, diletakkan dalam reservoir sumber panas pada temperatur T, penutup silinder akan bergerak dari posisi awal s_i menjadi jarak akhir s_f melawan tekanan luar P_{eks} . Volume gas pada saat penutup silinder pada posisi awal $V_i = A \cdot s_i$ dan pada posisi akhir $V_f = A \cdot s_f$. Kerja total yang dilakukan sistem gas dapat dihitung dengan rumus hasil integral dari persamaan:

$$\int \partial w = - \int_{V_i}^{V_f} P_{\text{eks}} \partial V$$

$$W = - P_{\text{eks}} (V_f - V_i) \quad (2.7)$$

Kerja pemuaian gas terjadi apabila volume gas akhir V_f lebih besar daripada V_i , sebaliknya jika volume gas akhir V_f lebih kecil daripada V_i , maka kerja pemampatan yang terjadi.

2.6. Kerja Pemuaian Gas Sempurna pada Suhu Tetap (Isothermal)

Sistem gas sempurna bertekanan P yang dibatasi oleh silinder penghisap dengan tekanan luar P_{eks} . Jika tekanan sistem gas sempurna sama dengan tekanan luarnya maka sistem gas berada dalam keadaan kesetimbangan mekanis dengan lingkungannya. Jika tekanan luar dibuat sedikit lebih kecil daripada tekanan sistem gas nya maka gas sempurna akan sedikit memuai, sebaliknya jika tekanan luar dibuat sedikit lebih besar daripada tekanan gas nya maka sistem gas sedikit dimampatkan. Pemuaian sistem gas sempurna akan terjadi secara dapat balik (*reversible*) jika selalu terjadi pencocokan tekanan sistem gas sempurna dengan tekanan luarnya. Nilai kerja pada pemuaian gas sempurna pada suhu tetap dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\partial w = - P_{\text{eks}} \cdot \partial V = - P \partial V$$

$$\int \partial w = - \int_{V_i}^{V_f} P \partial V \quad (2.8)$$

Pada sistem gas sempurna $P = \frac{nRT}{V}$, maka hasil integral menunjukkan:

$$\int \partial w = - \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} \partial V$$

$$w = - nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{1}{V} \partial V$$

$$w = - nRT [\ln V]_{V_i}^{V_f}$$

$$w = - nRT |\ln V_f - \ln V_i|$$

$$w = - nRT \ln \frac{V_f}{V_i} \quad (2.9)$$

$$w = + nRT \ln \frac{V_i}{V_f} \quad (2.10)$$

Berdasarkan hukum gas Gay Lussac, pada gas sempurna berlaku:

$$P_i V_i = P_f V_f$$

$$\frac{V_f}{V_i} = \frac{P_i}{P_f}$$

Perhitungan kerja pada pers. (2.10) dapat diubahsuai membentuk persamaan:

$$w = - nRT \ln \frac{P_i}{P_f} \quad (2.11)$$

$$w = + nRT \ln \frac{P_f}{P_i} \quad (2.12)$$

Contoh soal 2.3:

10 L gas sempurna pada 0°C dengan tekanan 10 atm, tentukan volume akhir dan kerja yang dilakukan kalau gas sempurna tersebut melakukan ekspansi *isothermal* dapat balik (*reversible*) sampai tekanan 1 atm.

Jawaban:

Menentukan jumlah mol (n) dari 10 L gas sempurna 0 °C dengan tekanan 10 atm.

$$PV = nRT$$

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{10 \text{ atm} \cdot 10 \text{ L}}{0,08205 \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \cdot 273 \text{ K}} = 4,457 \text{ mol}$$

Menentukan volume akhir pada proses ekspansi *isothermal* dapat balik (*reversible*):

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{10 \text{ atm} \cdot 10 \text{ L}}{1 \text{ atm}} = 100 \text{ L}$$

Menentukan kerja yang dilakukan pada ekspansi *isothermal* dapat balik (*reversible*):

$$w = -n R T \ln \frac{V_2}{V_1} = -4,457 \text{ mol } 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1} 273 \text{ K } \ln \frac{100 \text{ L}}{10 \text{ L}} = -23310 \text{ J}$$

Latihan 2.3:

10 L gas sempurna pada 25°C dengan tekanan 1 atm, tentukan tekanan akhir dan kerja yang dilakukan kalau gas sempurna tersebut melakukan ekspansi *isothermal* dapat balik (*reversible*) sampai volume 100 L.

2.7. Kalor dan Entalpi

Proses yang berlangsung pada volume tetap ($\Delta V=0$), menyebabkan tidak ada kerja mekanik yang dilakukan sistem atau $w = P \Delta V = 0$. Selanjutnya perubahan energi dalam pada proses yang berlangsung pada volume tetap menjadi:

$$\Delta U = q + w$$

$$\Delta U = q + 0$$

$$\Delta U = q_v \quad (2.13)$$

Jadi perubahan energi dalam suatu sistem setara dengan kalor yang menyertai proses yang berlangsung pada volume tetap.

Proses suatu sistem yang berlangsung pada tekanan tetap, volume sistem berubah dari keadaan awal (V_i) menjadi keadaan akhir (V_f) maka energi dalam sistem berubah dari U_i menjadi U_f . Persamaan perubahan energi dalam sistem dapat dinyatakan:

$$\Delta U = q + w$$

$$\Delta U = q_p - P \Delta V$$

$$U_f - U_i = q_p - P (V_f - V_i)$$

$$U_f - U_i = q_p - P V_f + P V_i$$

$$(U_f + P V_f) - (U_i + P V_i) = q_p$$

Dimana q_p adalah panas yang diadsorpsi oleh sistem pada proses tekanan tetap. Energi dalam (U), tekanan (P) dan volume (V) adalah

sifat keadaan sistem, maka $U + PV$ juga merupakan fungsi keadaan. Fungsi keadaan $U + PV$ disebut juga entalpi (H):

$$H = U + PV \quad (2.14)$$

Jadi pada proses sistem yang berlangsung pada tekanan tetap dapat ditulis sebagai:

$$\begin{aligned} H_f - H_i &= q_p \\ \Delta H &= q_p \end{aligned} \quad (2.15)$$

Berdasarkan hasil ini dapat disimpulkan bahwa perubahan entalpi suatu sistem adalah setara dengan kalor yang dipertukarkan antara sistem dan lingkungan dalam proses tekanan tetap.

2.8. Kapasitas Panas

Kapasitas panas (C) adalah panas yang diisap sistem per derajat temperatur. Capasitas panas suatu sistem dapat dinyatakan:

$$C = \frac{\partial q}{\partial T} \quad (2.16)$$

Kapasitas panas yang diukur pada volume tetap ($\partial V=0$), dapat dinyatakan sebagai:

$$\partial U = \partial q + \partial w$$

$$\partial U = \partial q - P\partial V$$

$$\partial U = \partial q_v$$

Jadi kapasitas panas yang diukur pada volume tetap dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned} C_V &= \frac{\partial q_v}{\partial T} \\ C_V &= \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V \end{aligned} \quad (2.17)$$

Kapasitas panas yang diukur pada tekanan tetap dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned} C_P &= \frac{\partial q_p}{\partial T} \\ C_P &= \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \end{aligned} \quad (2.18)$$

Kapasitas panas pada tekanan tetap (C_P) dan kapasitas panas pada volume tetap (C_V) dipergunakan untuk menyatakan panas setiap mol. Nilai C_P selalu lebih besar daripada nilai C_V , hal ini disebabkan kapasitas panas pada tekanan tetap bagian panas yang diisap oleh sistem tersebut digunakan untuk melakukan kerja, sedangkan kapasitas panas pada volume tetap semua panas yang diisap dipergunakan untuk kenaikan temperatur. Pada gas sempurna perbedaan kapasitas panas pada tekanan tetap (C_P) dengan kapasitas panas pada volume tetap (C_V) dapat dinyatakan:

$$C_P - C_V = nR \quad (2.19)$$

Hal ini dapat dibuktikan:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P - \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V = nR$$

Karena $H = U + PV$, jika persamaan ini didiferensialkan/diturunkan terhadap T pada tekanan tetap maka:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P &= \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P + P \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \\ \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P + P \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P - \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V &= nR \end{aligned}$$

Jika energi dalam merupakan fungsi temperatur dan volume atau $U = f(T;V)$, maka perubahan energi dalam daripada sistem tersebut secara matematika dapat dinyatakan:

$$\partial U = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V \partial T + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \partial V \quad (2.20)$$

Jika perubahan energi dalam diturunkan terhadap temperatur pada tekanan tetap, maka:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P &= \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V \left(\frac{\partial T}{\partial T}\right)_P + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \\ \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_P &= \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \\ \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P + P \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P - \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V &= nR \\ \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P + P \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P &= nR \end{aligned}$$

Nilai $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T$ pada gas sempurna adalah sama dengan nol, maka:

$$P\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = nR$$

Persamaan gas sempurna $PV = nRT$, maka:

$$V = \frac{nRT}{P}$$

Jika persamaan volume tersebut diturunkan terhadap temperatur pada tekanan tetap, maka:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = \frac{nR}{P}$$

Maka:

$$P\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = nR$$

$$P \frac{nR}{P} = nR$$

$$nR = nR$$

Untuk padatan dan cairan, pernyataan yang lebih berguna dapat dituliskan

$$C_p - C_v = \frac{\alpha^2 VT}{\beta} \quad (2.21)$$

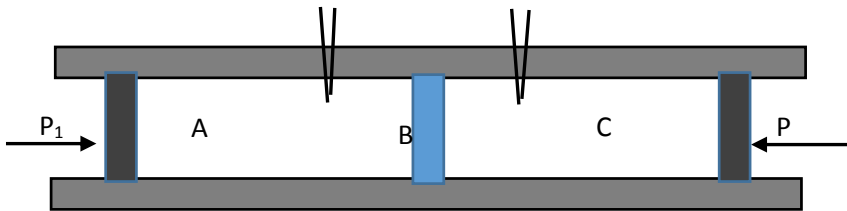
Di mana α merupakan koefisien ekspansi termal dan β koefisien kompresi atau factor kompresibilitas. Hal ini didefinisikan sebagai

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \quad (2.22)$$

$$\alpha = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \quad (2.23)$$

2.9. Percobaan Joule - Thomson

William Thomson (Lord-Kelvin) bekerja sama dengan Joule mengerjakan percobaan yang dikerjakan antara tahun 1852 dan 1862. Adapun peralatan percobaan Joule - Thomson seperti terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Percobaan Joule-Thomson

Percobaan Joule - Thomson dilakukan dengan mengalirkan gas dengan tekanan P_1 diruang A ke ruang C yang tekanannya rendah P_2 melewati dinding B yang berpori (*Porous*). Percobaan ini dilakukan secara adiabatik yaitu $q = 0$ (Artinya tidak ada panas yang diisap maupun dikeluarkan oleh sistem).

Misalnya: diruang A bertekanan P_1 dan volume V_1 (volume 1 mol gas pada tekanan P_1)

Diruang C bertekanan P_2 dan volume V_2 (volume 1 mol gas pada tekanan P_2)

Kerja yang dilakukan oleh 1 mol gas di A untuk menekan gas tersebut melalui dinding berpori adalah sebesar $W_1 = P_1 V_1$, sedangkan kerja yang dilakukan oleh 1 mol gas di C untuk melakukan ekspansi $W_2 = P_2 V_2$. Kerja bersih yang dilakukan gas adalah:

$$W = P_2 V_2 - P_1 V_1 \quad (2.24)$$

Perubahan energi dalam pada proses ini:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = q - W \quad (2.25)$$

Dikarenakan proses adiabatik, $q = 0$ maka:

$$\Delta E = -W$$

$$\Delta E = -(P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

$$E_2 - E_1 = -(P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

$$E_2 + P_2 V_2 = E_1 + P_1 V_1$$

Sedangkan $H = E + PV$, maka:

$$H_2 = E_2 + P_2 V_2$$

$$H_1 = E_1 + P_1 V_1$$

Dapat disimpulkan:

$$H_2 = H_1 \quad (2.26)$$

Jadi pada ekspansi Joule - Thomson terjadi pada enthalpi tetap atau disebut proses ISENTHALPIC. Dari percobaan Joule-Thomson dikenal adanya koefisien Joule -Thomson (μ_{JT}) yang didefinisikan sebagai perubahan temperatur pada perubahan tekanan pada enthalpi yang tetap.

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H \quad (2.27)$$

Harga koefisien Joule-Thomson (μ_{JT}):

1. $\mu_{JT} = +$ kalau terjadi pendinginan gas, yaitu bila ada penurunan temperatur; $\partial T = -$ sedangkan ∂P selalu mempunyai harga $= -$, pendinginan selalu disertai penurunan tekanan. $\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = \frac{(-)}{(-)} = +$

2. $\mu_{JT} = -$, kalau terjadi pemanasan gas pada ekspansi.

Penjabaran koefisien Joule-Thomson (μ_{JT})

Enthalpi (H) adalah fungsi temperatur (T) dan tekanan (P) atau dapat ditulis sebagai $H = f(T, P)$. Setelah enthalpi didiferensialkan membentuk:

$$\partial H = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \partial T + \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T \partial P \quad (2.28)$$

Pada proses Isenthalpic (H tetap), terdapat koefisien Joule Thomson. Pada proses ini terdapat tiga variabel yaitu H, T dan P. Dengan menggunakan aturan siklis akan diperoleh hubungan:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H \left(\frac{\partial P}{\partial H} \right)_T = -1 \quad (2.29)$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = - \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T$$

$$- \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T$$

Sebelumnya dikenal $\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P = C_P$ dan $\left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = \mu_{JT}$, setelah disubstitusikan diperoleh:

$$-C_P \times \mu_{JT} = \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T$$

$$\mu_{JT} = - \frac{1}{C_P} \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T \quad (2.30)$$

Karena $H = U + PV$ dan $\partial H = \partial U + \partial(PV)$, persamaan koefisien Joule-Thomson menjadi:

$$\begin{aligned}\mu_{JT} &= -\frac{1}{C_p} \left(\frac{\partial U + \partial(PV)}{\partial P} \right)_T \\ \mu_{JT} &= -\frac{1}{C_p} \left(\frac{\partial U}{\partial P} \right)_T - \frac{1}{C_p} \left(\frac{\partial(PV)}{\partial P} \right)_T\end{aligned}\quad (2.31)$$

Untuk gas ideal harga $\left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T = 0$, sehingga untuk gas ideal nilai koefisien Joule-Thomson $\mu_{JT} = 0$. Sedangkan untuk gas sejati nilai koefisien Joule-Thomson $\mu_{JT} \neq 0$.

Umumnya untuk gas sejati pada temperatur kamar akan mengalami pendinginan pada ekspansi Joule -Thomson. Tetapi H_2 akan mengalami pemanasan pada ekspansi Joule -Thomson bila temperatur mula-mula $> -80^\circ\text{C}$. Tetapi bila temperatur mula-mula $< -80^\circ\text{C}$, maka pada ekspansi H_2 ini akan mengalami pendinginan. Pada temperatur -80°C , dimana $\mu_{JT} = 0$ disebabkan temperatur inversi Joule-Thomson.

2.10. Jenis-jenis Perubahan Entalpi Standar

Perubahan entalpi standar (ΔH^0) adalah perubahan entalpi untuk proses yang zat awal dan akhirnya dalam keadaan standar. Keadaan standar suatu zat pada temperatur tertentu adalah bentuk murni zat tersebut pada tekanan 1 bar. Beberapa jenis perubahan entalpi adalah:

1. Entalpi penguapan standar (ΔH_{uap}^0)

Perubahan entalpi penguapan standar adalah perubahan entalpi per mol jika cairan murni pada tekanan 1 bar menguap menjadi gas pada tekanan 1 bar. Misalnya perubahan entalpi yang menyertai penguapan air.



2. Entalpi peleburan standar (ΔH_{uap}^0)

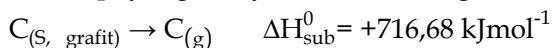
Perubahan entalpi peleburan standar adalah perubahan entalpi per mol jika padatan murni pada tekanan 1 bar mencair menjadi cair pada tekanan 1 bar. Misalnya perubahan entalpi yang

menyertai es pada tekanan 1 bar meleleh menjadi air cair pada tekanan 1 bar.

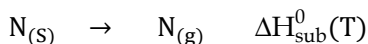


3. Entalpi sublimasi standar (ΔH_{sub}^0)

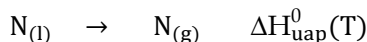
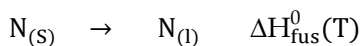
Perubahan entalpi sublimasi standar adalah perubahan entalpi per mol jika padatan menguap pada tekanan 1 bar. Misalnya perubahan entalpi yang menyertai sublimasi grafit.



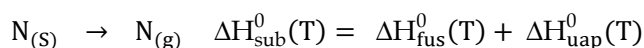
Ada beberapa senyawa yang menyublim melalui beberapa tahap, tetapi besarnya perubahan entalpi suatu proses tidak bergantung pada berapa tahap reaksi itu berlangsung. Sebagai ilustrasi dapat diperhatikan proses berikut:



Tahap reaksi yang menyertai proses penyubliman $\text{N}_{(s)}$ adalah:



Reaksi secara keseluruhan



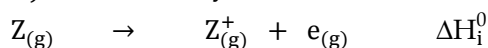
4. Entalpi pelarutan standar (ΔH_{sol}^0)

Perubahan entalpi yang menyertai proses pelarutan zat di dalam sejumlah tertentu pelarut. Misalnya perubahan entalpi pelarutan standar dari HCl,



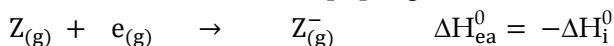
5. Entalpi pengionan standar (ΔH_i^0)

Perubahan entalpi pengionan standar adalah perubahan entalpi yang menyertai proses penghilangan satu elektron. Perubahan entalpi pengionan standar elektron pertama (ΔH_{i1}^0) lebih rendah dibandingkan perubahan entalpi pengionan standar elektron kedua (ΔH_{i2}^0) atau selebihnya.



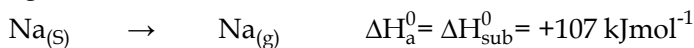
6. Entalpi perolehan elektron/afinitas elektron standar (ΔH_{ea}^0)

Perubahan entalpi afinitas elektron standar adalah perubahan entalpi yang menyertai pengikatan elektron pada suatu atom, ion atau molekul dalam fase gas. Perubahan entalpi afinitas elektron standar adalah lawan dari entalpi pengionan standar.



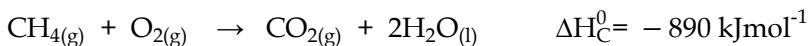
7. Entalpi pengatoman standar (ΔH_a^0)

Perubahan entalpi pengatoman standar adalah perubahan entalpi yang menyertai pemisahan semua atom dalam suatu zat dapat berupa unsur atau senyawa. Contoh perubahan entalpi pengatoman standar



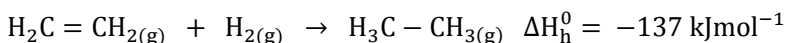
8. Entalpi pembakaran standar (ΔH_c^0)

Perubahan entalpi pembakaran standar adalah perubahan entalpi yang menyertai reaksi 1 mol zat dengan gas oksigen.



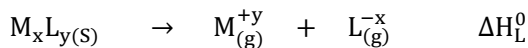
9. Entalpi hidrogenasi standar

Perubahan entalpi hidrogenasi standar adalah perubahan entalpi yang menyertai reaksi hidrogenasi 1 mol senyawa organik tidak jenuh.



10. Entalpi kisi standar (ΔH_L^0)

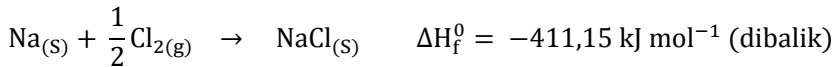
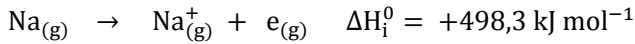
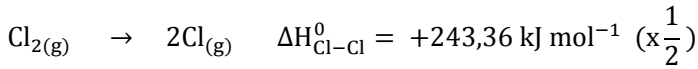
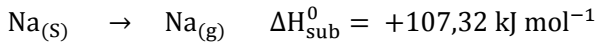
Perubahan entalpi kisi adalah perubahan entalpi standar yang menyertai pembentukan ion-ion gas dari padatan kristalnya.



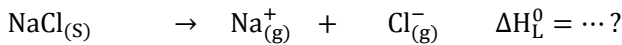
Contoh soal 2.4:

Diketahui data energi desosiasi gas Cl_2 , energi sublimasi natrium, energi ionisasi natrium, energi afinitas elektron klorium dan energi pembentukan standar natrium klorida berturut-turut adalah $+243,36 \text{ kJ mol}^{-1}$, $+107,32 \text{ kJ mol}^{-1}$, $+498,3 \text{ kJ mol}^{-1}$, $-351,2 \text{ kJ mol}^{-1}$, dan $-411,15 \text{ kJ mol}^{-1}$, hitung energi kisi natrium klorida ($NaCl_{(s)}$) pada temperatur 298 K.

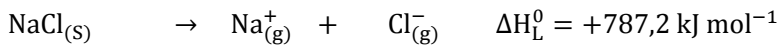
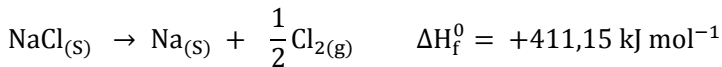
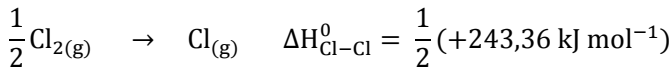
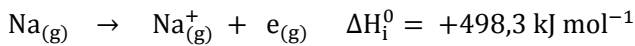
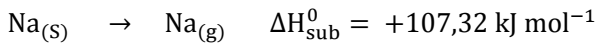
Jawaban:



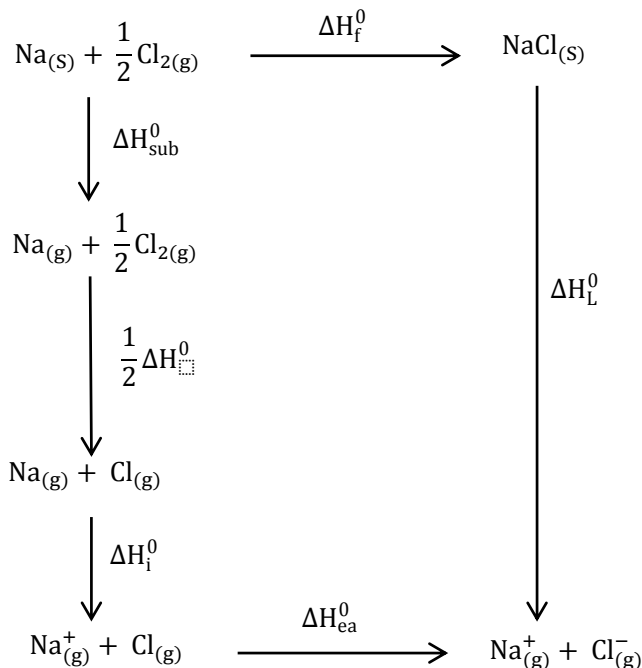
Ditanya



Cara hukum Hess:



Cara siklus Born-Haber



$$\Delta H_L^0 + \Delta H_f^0 = \Delta H_{\text{sub}}^0 + \frac{1}{2} \Delta H_{\text{Cl-Cl}}^0 + \Delta H_i^0 + \Delta H_{\text{ea}}^0$$

$$\Delta H_L^0 + (-411,15) = (+107,32) + \frac{1}{2}(+243,36) + (+498,3) + (-351,2)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta H_L^0 &= (+107,32) + \frac{1}{2}(+243,36) + (+498,3) + (-351,2) - (-411,15) \\
 &= +787,2 \text{ kJ mol}^{-1}
 \end{aligned}$$

Jadi energi kisi $\text{NaCl}_{(s)}$ adalah $+787,2 \text{ kJ mol}^{-1}$

Latihan 2.4:

Diketahui data energi desosiasi gas Cl_2 , energi sublimasi magnesium, energi ionisasi pertama magnesium, energi ionisasi kedua magnesium, energi afinitas elektron klorium dan energi pembentukan standar natrium klorida berturut-turut adalah $+243,36 \text{ kJ mol}^{-1}$, $+147,7 \text{ kJ mol}^{-1}$, $+737,7 \text{ kJ mol}^{-1}$, $+1450,7 \text{ kJ mol}^{-1}$, $-351,2 \text{ kJ mol}^{-1}$, dan $-411,15 \text{ kJ mol}^{-1}$, hitung energi kisi natrium klorida ($\text{MgCl}_{2(s)}$) pada temperatur 298 K.

2.11. Pengukuran Perubahan Entalpi

Pengukuran perubahan entalpi dilakukan dengan memantau perubahan temperatur yang mengikuti proses sistem yang terjadi pada tekanan tetap. Cara untuk menentukan perubahan entalpi dengan menggunakan kalorimeter. Kalorimeter adiabatik digunakan untuk menentukan perubahan entalpi reaksi pembakaran. Kalorimeter bom digunakan untuk menentukan perubahan entalpi dengan cara mengubah nilai perubahan energi dalam menjadi perubahan entalpi.

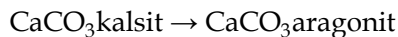
2.11.1. Penentuan Perubahan Entalpi dari Reaksi yang Tidak Melibatkan Gas.

Reaksi kimia yang tidak melibatkan zat-zat dalam fase gas, nilai perubahan entalpi (ΔH) dan perubahan energi dalam (ΔU) yang menyertai reaksi tersebut hampir sama.

Contoh soal 2.5:

Perubahan energi dalam dari 1 mol CaCO_3 dari bentuk kalsit menjadi bentuk aragonite adalah + 0,21 kJ. Hitung perubahan entalpi jika tekanan 1,0 bar. Rapatatan padatan dalam bentuk kalsit $2,71 \text{ g cm}^{-3}$ dan dalam bentuk aragonite $2,93 \text{ g cm}^{-3}$.

Jawaban:



$$\Delta H = H_{\text{aragonit}} - H_{\text{Kalsit}}$$

$$\Delta H = (U_a + PV_a) - (U_k + PV_k)$$

$$\Delta H = (U_a - U_k) + P(V_a - V_k)$$

$$\text{Massa 1 mol CaCO}_3 = 100 \text{ g mol}^{-1}$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$\text{Volume 1 mol CaCO}_3$$

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V_{\text{kalsit}} = \frac{100 \text{ g}}{2,71 \text{ g cm}^{-3}} = 37 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{aragonit}} = \frac{100 \text{ g}}{2,93 \text{ g cm}^{-3}} = 34 \text{ cm}^3$$

$$\Delta H = (U_a - U_k) + P(V_a - V_k)$$

$$\Delta H = 0,21 \text{ kJ} + 1,0 \text{ atm}(34 - 37) \text{ cm}^3$$

$$\Delta H = 0,21 \text{ kJ} + 1,0 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2} (34 - 37) \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\Delta H = 0,21 \text{ kJ} - 0,3 \text{ Nm}$$

$$\Delta H = 0,21 \text{ kJ} - 0,3 \text{ J} = 210 \text{ J} - 0,3 \text{ J} = 209,7 \text{ J}$$

Jadi ΔH dan ΔU hampir sama hanya berbeda sedikit 0,1 persen.

Latihan 2.5:

1,0 mol timah abu-abu ($\rho = 5,75 \text{ g cm}^{-3}$) terkonversi menjadi timah putih ($\rho = 7,31 \text{ g cm}^{-3}$) pada tekanan 10 bar dan temperatur 298 K, memiliki perubahan entalpi (ΔH) = +2,1 kJ. Tetukan perbedaan antara ΔH dan ΔU .

2.11.2. Penentuan Perubahan Entalpi Reaksi yang Melibatkan Zat-zat Berfase Gas

Jika reaksi yang menghasilkan gas dan menganggap semua gas adalah gas sempurna maka entalpi setiap gas dapat dinyatakan:

$$H = U + PV = U + nRT$$

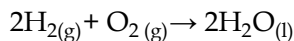
Perubahan entalpi reaksi yang melibatkan gas, dapat dirumuskan:

$$\Delta H = \Delta U + \Delta n_g RT$$

Dengan Δn_g adalah perubahan jumlah mol gas dalam reaksi atau selisih koefisien hasil reaksi dan koefisien pereaksi yang berwujud gas.

$$\Delta n_g = \sum n_g \text{ hasil reaksi} - \sum n_g \text{ pereaksi} \quad (2.34)$$

Contohnya dalam reaksi berikut:

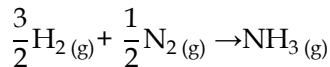


$$\Delta n_g = 0 - (2+1) \text{ mol} = -3 \text{ mol}$$

Contoh soal 2.6:

Pada reaksi pembentukan 1,0 mol gas ammonia dari unsur-unsurnya pada suhu 298 K, disertai perubahan entalpi sebesar -46,1 kJ. Hitunglah nilai perubahan energi dalamnya.

Jawaban:



Nilai Δn_g adalah

$$\Delta n_g = 1 \text{ mol} - (1,5 + 0,5) \text{ mol} = -1 \text{ mol}$$

Maka nilai ΔU adalah

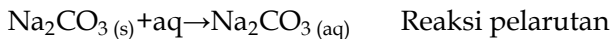
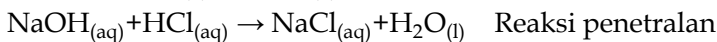
$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta H - \Delta n_g RT = -46,1 \text{ kJ} - (-1 \text{ mol}) \times 8,314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1} \times 298 \text{ K} \\ \Delta U &= -46,1 \text{ kJ} + 2,48 \text{ kJ} = -43,6 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Latihan 2.6:

Hitunglah perubahan energi dalam untuk reaksi pembakaran 1 mol propena yang memiliki perubahan entalpi -2058 kJ.

2.11.3. Penentuan Kalor Reaksi Secara Eksperimen (Kalorimetri)

Penentuan perubahan entalpi secara eksperimen menggunakan kalorimeter hanya dapat diaplikasikan pada reaksi-reaksi berkesudahan yang berlangsung cepat. Contoh reaksi berkesudahan diantaranya reaksi pembakaran, reaksi penetralan dan reaksi pelarutan.



Penentuan perubahan entalpi secara eksperimen didasarkan pada pengukuran perubahan suhu dari larutan atau air didalam kalorimeter.

Contoh soal 2.7:

0,5 gram n-heptana (C_7H_{16}) dibakar dengan gas oksigen berlebih dalam kalorimeter bom (bervolume tetap) secara sempurna menghasilkan gas karbondioksida dan uap air. Suhu air yang

mengelilingi wadah pembakaran meningkat 3°C. Jika Kapasitas panas kalorimeter dan perlengkapannya adalah 8200 J K⁻¹ dan suhu rata-rata kalorimeter adalah 25°C, Tentukan perubahan energi dalam dan perubahan entalpi per mol heptana.

Jawaban:

Menentukan perubahan energi dalam (ΔU)

Kalor yang diterima kalorimeter dan perlengkapannya dari sistem pembakaran 0,5 g heptane adalah:

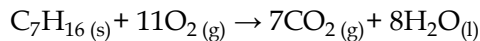
$$n = \frac{g}{Mr} = \frac{0,5 \text{ g}}{100 \text{ g mol}^{-1}} = 5 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$q_v = C_v \Delta T$$

$q_v = 8200 \text{ JK}^{-1} \times 3 \text{ K} = 24600 \text{ J} = 24,6 \text{ kJ}$ (untuk $5 \times 10^{-3} \text{ mol}$ n-heptana)
 Karena sistem pembakaran melepas kalor maka perubahan energi dalam (ΔU) bernilai negatif. Jadi perubahan energi dalam per mol n-heptana

$$\Delta U = \frac{-q_v}{n} = \frac{-24,6 \text{ kJ}}{5 \times 10^{-3} \text{ mol}} = -4920 \text{ kJ mol}^{-1}$$

Menentukan perubahan entalpi (ΔH)



$$\Delta n_g = 7 - 11 = -4 \text{ mol}$$

$$\Delta H = \Delta U + \Delta n_g RT$$

$$\begin{aligned} \Delta H &= -4920 \text{ kJ mol}^{-1} + (-4) \times 8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \times 298 \text{ K} \\ &= -4929,1 \text{ kJ mol}^{-1} \end{aligned}$$

2.11.4. Penentuan Perubahan Entalpi dengan Menggunakan Hukum Hess

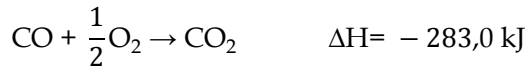
Penentuan perubahan entalpi menggunakan hukum Hess terutama digunakan untuk penentuan perubahan entalpi yang tidak dapat ditentukan melalui eksperimen.

Hukum Hess menyatakan perubahan entalpi suatu reaksi kimia tidak bergantung pada jalannya reaksi kimia tetapi hanya

tergantung pada keadaan awal dan akhir reaksi atau perubahan entalpi suatu reaksi tidak bergantung pada apakah reaksi kimia yang bersangkutan berjalan satu tahap atau melalui beberapa tahap.

Contoh soal 2.8:

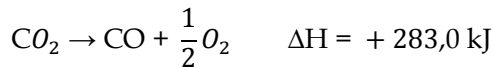
Diketahui data reaksi pembakaran karbon dan karbon mono oksida:



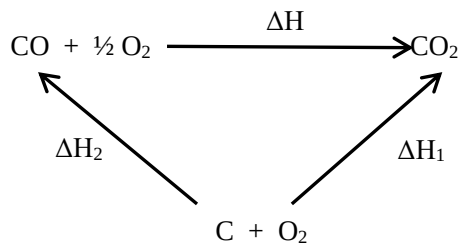
Hitunglah perubahan entalpi reaksi pembakaran karbon menjadi karbon monooksida.

Jawaban:

Cara pertama:



Cara kedua:



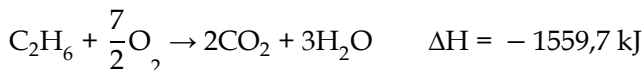
$$\Delta H_1 = \Delta H_2 + \Delta H$$

$$\Delta H = \Delta H_1 - \Delta H_2$$

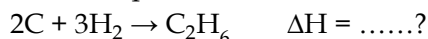
$$\Delta H = -393,5 \text{ kJ} - (-283,0) \text{ kJ} = -110,5 \text{ kJ}$$

Latihan 2.8:

Disajikan data perubahan entalpi dari reaksi:

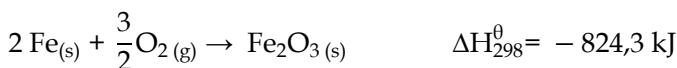


Hitunglah perubahan entalpi dari:



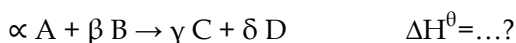
2.11.5. Penentuan Perubahan Entalpi Reaksi Menggunakan Data Entalpi Pembentukan Standar

Entalpi pembentukan standar (ΔH_f^θ) adalah perubahan entalpi yang menyertai reaksi pembentukan **satu mol senyawa dari unsur-unsur nya** dalam keadaan referensinya. Keadaan referensi suatu unsur adalah keadaan yang paling stabil pada temperatur tertentu dan tekanan 1 bar. Perubahan entalpi pembentukan standar suatu senyawa umumnya ditentukan pada temperatur 298K. Perubahan entalpi pembentukan standar hanya dimiliki oleh senyawa, maka perubahan entalpi pembentukan standar untuk unsur adalah nol. Misalnya entalpi pembentukan standar bagi H_2O dan Fe_2O_3



Dapat disimpulkan perubahan entalpi standar pembentukan H_2O dan Fe_2O_3 berturut-turut $\Delta H_f^\theta \text{H}_2\text{O}_{(l)} = -285,8 \text{ kJmol}^{-1}$ dan $\Delta H_f^\theta \text{Fe}_2\text{O}_{3(s)} = -824,3 \text{ kJmol}^{-1}$.

Prinsip perhitungan perubahan entalpi reaksi sembarang berdasarkan perubahan entalpi pembentukan standar adalah sebagai berikut:



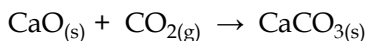
Dengan α , β , γ , dan δ adalah koefisien reaksi dan $\Delta H_f^\theta A$, $\Delta H_f^\theta B$, $\Delta H_f^\theta C$ dan $\Delta H_f^\theta D$ adalah perubahan entalpi pembentukan standar senyawa A, B, C dan D, selanjutnya perubahan entalpi reaksi sembarang ΔH^θ dapat dinyatakan:

$$\Delta H^\theta = \sum \Delta H_f^\theta \text{ hasil reaksi} - \sum \Delta H_f^\theta \text{ pereaksi} \quad (2.35)$$

$$\Delta H^\theta = \{ \gamma. \Delta H_f^\theta C + \delta. \Delta H_f^\theta D - \alpha. \Delta H_f^\theta A - \beta. \Delta H_f^\theta B \} \quad (2.36)$$

Contoh soal 2.9:

Diketahui data perubahan entalpi pembentukan standar dari senyawa CaCO_3 , CaO dan CO_2 berturut-turut $-1206,9$; $-635,1$ dan $-393,5$ kJ. Hitung perubahan entalpi dari reaksi berikut:



Jawaban:

$$\Delta H^\theta = \{ \Delta H_f^\theta \text{CaCO}_{3(s)} - \Delta H_f^\theta \text{CaO}_{(s)} - \Delta H_f^\theta \text{CO}_{2(g)} \}$$

$$\Delta H^\theta = -1206,9 - (-635,1) - (-393,5) \text{ kJ}$$

$$\Delta H^\theta = -178,3 \text{ kJ}$$

Latihan 2.9:

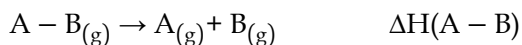
Diketahui data perubahan entalpi pembentukan standar dari senyawa SO_3 dan SO_2 berturut-turut $-395,7$ dan $-296,8$ kJ. Hitung perubahan entalpi dari reaksi pembakaran gas SO_2 menjadi gas SO_3 .

2.11.6. Penentuan Perubahan Entalpi Reaksi Menggunakan Data Energi Ikatan

Pendekatan ini hanya digunakan dalam reaksi antara zat-zat berfase gas dengan ikatan kovalen. Hal ini dengan mempertimbangkan bahwa (a) semua ikatan dari suatu jenis tertentu, contohnya C-H dalam senyawa CH_4 adalah setara dan identik. (b) Nilai energi ikatan dari jenis tertentu adalah sama, tidak tergantung pada jenis senyawa dimana ikatan itu berada.

Ada dua jenis energi ikatan:

1. Energi disosiasi ikatan $\Delta H^\theta(A - B)$ adalah entalpi reaksi standar untuk proses pemutusan ikatan $A - B$ dalam senyawa AB berfase gas.

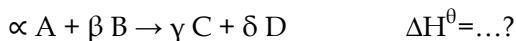


A dan B dapat berupa atom atau kumpulan atom, misalnya:



2. Energi ikatan rata-rata $B(A-B)$ adalah nilai energi disosiasi ikatan dari ikatan $A-B$ yang dirata-ratakan dari satu sisi senyawa serumpun. Contohnya nilai energi ikatan $C-H$ dihitung dari senyawa CH_4 , H_3COH , H_3CCOOH dan senyawa serumpun lainnya, $\epsilon_{C-H} = 414,2 \text{ kJ mol}^{-1}$

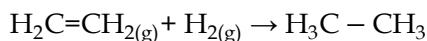
Selanjutnya penentuan entalpi reaksi sembarang berdasarkan data energi ikatan dapat dinyatakan:



$$\Delta H^\theta = \sum \text{Total energi ikatan pereaksi} - \sum \text{Total energi ikatan hasil reaksi} \quad (2.37)$$

Contoh soal 2.10:

Diketahui data energi ikatan $C=C$; $C-H$; $C-C$ dan $H-H$ berturut-turut 615; 412,2; 347,3 dan 436 kJ mol^{-1} . Hitunglah perubahan entalpi reaksi berikut:



Jawaban:

$$\Delta H^\theta = \sum \text{Total energi ikatan pereaksi} - \sum \text{Total energi ikatan hasil reaksi}$$

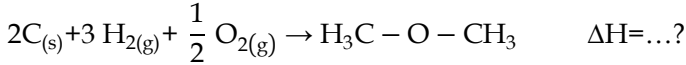
$$\Delta H^\theta = (4 \cdot \epsilon_{C-H} + \epsilon_{C=C} + \epsilon_{H-H}) - (6 \cdot \epsilon_{C-H} + \epsilon_{C-C})$$

$$\Delta H^\theta = \{((4 \times 412,2) + 615 + 436) - ((6 \times 412,2) + 347,3)\} \text{ kJmol}^{-1}$$

$$\Delta H^\theta = -124,7 \text{ kJmol}^{-1}$$

Latihan 2.10:

Diketahui data energi ikatan O=O; C-H; C-O dan H-H berturut-turut 498,7; 412,2; 351,5 dan 436 kJ mol⁻¹, kalor sublimasi 716,7 kJ mol⁻¹. Hitunglah perubahan entalpi reaksi berikut:

**2.12. Kerja Adiabatis Gas Sempurna**

Pengembangan gas sempurna yang **tidak disertai perpindahan kalor** disebut pengembangan adiabatik. Karena tidak ada perpindahan kalor ($q = 0$), maka menurut hukum Termodinamika Pertama:

$$\Delta U = q + w$$

$$\Delta U = \Delta w$$

$$\partial U = \partial w$$

$$C_V \partial T = -P \partial V$$

$$C_V \partial T = -\frac{nRT}{V} \partial V$$

$$\frac{C_V}{nRT} \partial T = -\frac{1}{V} \partial V$$

$$\frac{C_V}{nR} \int_{T_i}^{T_f} \frac{1}{T} \partial T = - \int_{V_i}^{V_f} \frac{1}{V} \partial V$$

$$\frac{C_V}{nR} (\ln T_f - \ln T_i) = - (\ln V_f - \ln V_i)$$

$$\frac{C_V}{nR} \ln \frac{T_f}{T_i} = - \ln \frac{V_f}{V_i}$$

$$\frac{C_V}{nR} \ln \frac{T_f}{T_i} = \ln \frac{V_i}{V_f}$$

Jika jumlah mol ($n = 1$)

$$\ln \left(\frac{T_f}{T_i} \right)^{\frac{C_V}{R}} = \ln \frac{V_i}{V_f}$$

$$\left(\frac{T_f}{T_i} \right)^{\frac{C_V}{R}} = \left(\frac{V_i}{V_f} \right) \quad (2.38)$$

$$V_f \cdot (T_f)^{\frac{C_V}{R}} = V_i \cdot (T_i)^{\frac{C_V}{R}} \quad (2.39)$$

Karena $C_P - C_V = R$,

$$\begin{aligned}\frac{C_V}{nR} \ln \frac{T_f}{T_i} &= \ln \frac{V_i}{V_f} \\ \ln \frac{T_f}{T_i} &= \frac{C_P - C_V}{C_V} \ln \frac{V_i}{V_f} \\ \text{Jika } \frac{C_P}{C_V} &= \gamma, \\ \ln \frac{T_f}{T_i} &= (\gamma - 1) \ln \frac{V_i}{V_f} \\ \ln \frac{T_f}{T_i} &= \ln \left(\frac{V_i}{V_f} \right)^{(\gamma-1)} \\ \frac{T_f}{T_i} &= \left(\frac{V_i}{V_f} \right)^{(\gamma-1)}\end{aligned}\tag{2.40}$$

$$T_f \cdot (V_f)^{(\gamma-1)} = T_i \cdot (V_i)^{(\gamma-1)}\tag{2.41}$$

$$\text{Karena } \frac{T_f}{T_i} = \frac{P_f V_f}{P_i V_i},$$

$$\begin{aligned}\frac{P_f V_f}{P_i V_i} &= \left(\frac{V_i}{V_f} \right)^{(\gamma-1)} \\ P_f V_f \cdot (V_f)^{(\gamma-1)} &= P_i V_i \cdot (V_i)^{(\gamma-1)} \\ P_f V_f V_f^{\gamma} V_f^{-1} &= P_i V_i V_i^{\gamma} V_i^{-1} \\ P_f V_f^{\gamma} &= P_i V_i^{\gamma}\end{aligned}\tag{2.42}$$

Contoh soal 2.11:

10 L gas sempurna pada 0 °C dengan tekanan 10 atm, tentukan volume akhir dan kerja yang dilakukan kalau gas sempurna tersebut melakukan pemuaian adiabatik dapat balik sampai tekanan 1 atm.

$$(C_V = \frac{3}{2} R)$$

Jawaban:

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{10 \text{ L} \times 10 \text{ atm}}{0,08205 \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \times 273 \text{ K}} = 4,457 \text{ mol}$$

pada pemuaian adiabatik

$$\begin{aligned}C_P - C_V &= R \\ C_P &= R + C_V\end{aligned}$$

$$\text{Karena } (C_V = \frac{3}{2} R),$$

$$C_P = R + \frac{3}{2} R = \frac{5}{2} R$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{5/2 R}{3/2 R} = \frac{5}{3}$$

Menghitung volume akhir:

$$\begin{aligned} P_f V_f^\gamma &= P_i V_i^\gamma \\ 1 \text{ atm } V_f^{5/3} &= 10 \text{ atm } (10)^{5/3} \\ \log V_f^{5/3} &= \log 10 + \log (10)^{5/3} \\ \log V_f^{5/3} &= 1 + \frac{5}{3} = \frac{8}{3} \\ \frac{5}{3} \log V_f &= \frac{8}{3} \\ \log V_f &= \frac{8}{5} \\ V_f &= 39,8 \text{ L} \end{aligned}$$

Menentukan temperatur akhir

$$\begin{aligned} \frac{T_f}{T_i} &= \left(\frac{V_i}{V_f} \right)^{(\gamma-1)} \\ T_f &= T_i \left(\frac{V_i}{V_f} \right)^{(\gamma-1)} = 273 \text{ K} \left(\frac{10}{39,8} \right)^{(5/3-1)} = 108,8 \text{ K} \end{aligned}$$

Menghitung kerja adiabatik

$$\begin{aligned} \partial w &= \partial U \\ \partial w &= C_v \partial T \\ \int \partial w &= \int_i^f C_v \partial T \\ w &= C_v (T_f - T_i) \\ w &= \frac{3}{2} R (T_f - T_i) \\ w &= \frac{3}{2} 8,314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1} (108,8 - 273) \text{ K} = -2047,74 \text{ J mol}^{-1} \end{aligned}$$

kerja untuk 4,457 mol adalah

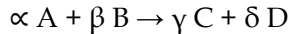
$$w = 4,457 \text{ mol} \times (-2047,74) \text{ J mol}^{-1} = -9126,8 \text{ J}$$

Latihan 2.11:

1 L gas sempurna pada 25°C dengan tekanan 10 atm, tentukan volume akhir dan kerja yang dilakukan kalau gas sempurna tersebut melakukan pemuaian adiabatik dapat balik sampai tekanan 1 atm.
 $(C_V = \frac{3}{2}R)$

2.13. Hubungan Antara Temperatur dan Energi Reaksi

Perhatikan reaksi berikut:



Perubahan energi dalam suatu reaksi kimia sembarang diatas dapat ditulis:

$$\Delta U = \sum U_{\text{Hasil reaksi}} - \sum U_{\text{Pereaksi}} \quad (2.43)$$

$$\Delta U = \gamma \cdot U_C + \delta \cdot U_D - \alpha \cdot U_A - \beta \cdot U_B \quad (2.44)$$

Energi dalam suatu sistem merupakan fungsi temperatur dan volume, $U=f(T,V)$. Pada volume tetap dan temperatur berubah, hasil turunan perubahan energi dalam menjadi:

$$\left(\frac{\partial \Delta U}{\partial T}\right)_V = \gamma \cdot \left(\frac{\partial U_C}{\partial T}\right)_V + \delta \cdot \left(\frac{\partial U_D}{\partial T}\right)_V - \alpha \cdot \left(\frac{\partial U_A}{\partial T}\right)_V - \beta \cdot \left(\frac{\partial U_B}{\partial T}\right)_V$$

Karena $\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V = C_V$, maka:

$$\left(\frac{\partial \Delta U}{\partial T}\right)_V = \gamma \cdot C_{V(C)} + \delta \cdot C_{V(D)} - \alpha \cdot C_{V(A)} - \beta \cdot C_{V(B)}$$

$$\left(\frac{\partial \Delta U}{\partial T}\right)_V = \Delta C_V$$

$$\partial \Delta U = \Delta C_V \partial T$$

$$\int 1 \partial \Delta U = \int_i^f \Delta C_V \partial T$$

Jika $C_V = f(T)$

$$\Delta U = \int_i^f \Delta C_V \partial T \quad (2.45)$$

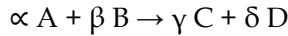
Jika $C_V \neq f(T)$ atau $C_V = \text{konstanta}$

$$\Delta U = \Delta C_V \int_i^f 1 \partial T$$

$$\Delta U = \Delta C_V (T_f - T_i) \quad (2.46)$$

2.14. Kebergantungan Perubahan Entalpi Suatu Reaksi Kimia

Perhatikan reaksi berikut:



$$\Delta H = \sum H_{\text{Hasil reaksi}} - \sum H_{\text{Pereaksi}} \quad (2.47)$$

$$\Delta H = \gamma \cdot H_C + \delta \cdot H_D - \alpha \cdot H_A - \beta \cdot H_B \quad (2.48)$$

Entalpi suatu sistem merupakan fungsi temperatur dan tekanan, $H=f(T,P)$. Pada tekanan tetap dan temperatur berubah, hasil turunan perubahan entalpi reaksi sembarang menjadi:

$$\left(\frac{\partial \Delta H}{\partial T}\right)_P = \gamma \cdot \left(\frac{\partial H_C}{\partial T}\right)_P + \delta \cdot \left(\frac{\partial H_D}{\partial T}\right)_P - \alpha \cdot \left(\frac{\partial H_A}{\partial T}\right)_P - \beta \cdot \left(\frac{\partial H_B}{\partial T}\right)_P$$

Karena $\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P = C_P$, maka:

$$\left(\frac{\partial \Delta H}{\partial T}\right)_P = \gamma \cdot C_{P(C)} + \delta \cdot C_{P(D)} - \alpha \cdot C_{P(A)} - \beta \cdot C_{P(B)}$$

$$\left(\frac{\partial \Delta H}{\partial T}\right)_P = \Delta C_P$$

$$\partial \Delta H = \Delta C_P \partial T$$

$$\int_i^f \partial \Delta H = \int_i^f \Delta C_P \partial T$$

Jika $C_P \neq f(T)$, C_P tidak mengandung variabel T atau C_P adalah konstanta, maka perubahan entalpi dapat dinyatakan:

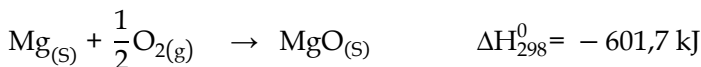
$$\int_i^f \partial \Delta H = \Delta C_P \int_i^f 1 \partial T$$

$$\Delta H_f^0 - \Delta H_i^0 = \Delta C_P (T_f - T_i) \quad (2.49)$$

Contoh soal 2.12:

Diketahui data kapasitas kalor dari Mg, O₂ dan MgO berturut-turut 24,9; 29,4 dan 37,2 J K⁻¹ mol⁻¹. Perubahan entalpi pembakaran magnesium menjadi magnesium oksida pada 298 K adalah -601,7 kJ. Tentukan perubahan entalpi reaksi pada suhu 1298 K

Jawaban:



$$\Delta C_P = C_{P(\text{MgO})} - C_{P(\text{Mg})} - \frac{1}{2} C_{P(\text{O}_2)}$$

$$\Delta C_P = \left(37,2 - 24,9 - \frac{1}{2} (29,4) \right) = -2,4 \text{ J K}^{-1}$$

$$\Delta H_f^0 - \Delta H_i^0 = \Delta C_P (T_f - T_i)$$

$$\Delta H_{1298}^0 - \Delta H_{298}^0 = -2,4 (1298 - 298)$$

$$\Delta H_{1298}^0 - (-601,7) \text{ kJ} = -2,4 \text{ J K}^{-1} (1298 - 298) \text{ K}$$

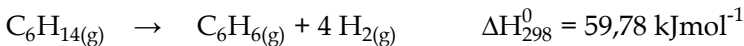
$$\Delta H_{1298}^0 = -601,7 \text{ kJ} - 2,4 \times 10^3 \text{ J}$$

$$\Delta H_{1298}^0 = -604,1 \text{ kJ}$$

Latihan 2.12:

Diketahui data kapasitas kalor dari C_6H_{14} , C_6H_6 dan H_2 adalah berturut-turut 7,3; -0,28 dan

6,9 $\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$. Perubahan entalpi reaksi berikut pada 298 K adalah:



Tentukan ΔH^0 reaksi pada suhu 500 °C

Jika $C_P = f(T)$, C_P mengandung variabel T , misalnya $\Delta C_P = a + bT + cT^2$

$$\Delta H_T^0 = \int_i^f \Delta C_P \partial T \quad (2.50)$$

$$\Delta H_T^0 = \int_i^f a + bT + cT^2 \partial T$$

$$\Delta H_T^0 = \int_i^f a \partial T + \int_i^f bT \partial T + \int_i^f cT^2 \partial T$$

$$\Delta H_T^0 = aT + b \left(\frac{1}{2} T^2 \right) + c \left(\frac{1}{3} T^3 \right) + C \quad (2.51)$$

Persamaan ini disebut persamaan Kirchoff.

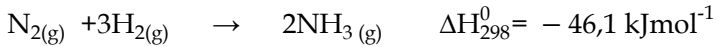
Contoh soal 2.13:

Diketahui data kapasitas kalor antara 250 - 450 K dari N_2 , H_2 dan NH_3 adalah sebagai berikut:

$$C_{P(\text{N}_2)} = 27,9 + 0,004 T \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

$$C_{P(\text{H}_2)} = 29,6 + 0,002 T \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

$$C_{P(\text{NH}_3)} = 29,9 + 0,003 T \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$$



Tentukan $\Delta H_{400}^0 = ?$

Jawaban:

$$\Delta C_P = 2C_{P(\text{NH}_3)} - C_{P(\text{N}_2)} - 3C_{P(\text{H}_2)}$$

$$\Delta C_P = 2(29,9 + 0,003 T) - (27,9 + 0,004T) - 3(29,6 + 0,002T) \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

$$\Delta C_P = (-56,9 - 0,004T) \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

$$\Delta H_T^0 = \int_i^f \Delta C_P \partial T$$

$$\Delta H_T^0 = \int_i^f (-56,9 - 0,004T) \partial T$$

$$\Delta H_T^0 = \int_i^f -56,9 \partial T - \int_i^f 0,004T \partial T$$

$$\Delta H_T^0 = -56,9 T - \frac{0,004}{2} T^2 + C$$

Perubahan entalpi reaksi pada suhu 298 K:

$$\Delta H_{298}^0 = -56,9 (298) - 0,002(298)^2 + C$$

$$-46100 = (-56,9 (298) - 0,002(298)^2 + C$$

$$C = +17133,8 - 46100 = -28966,2$$

Perubahan entalpi reaksi pada suhu 400 K:

$$\Delta H_{1298}^0 = -56,9 (1298) - 0,002(1298)^2 + C$$

$$\Delta H_{400}^0 = -56,9 (400) - 0,002(400)^2 + (-28966,2)$$

$$\Delta H_{400}^0 = -23080 + (-28966,2)$$

$$\Delta H_{400}^0 = -52046,2 \text{ J mol}^{-1} = -52,0462 \text{ kJ mol}^{-1}$$

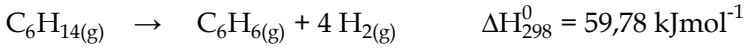
Latihan 2.13:

Diketahui data kapasitas kalor dari C_6H_{14} , C_6H_6 dan H_2 adalah sebagai berikut:

$$C_{P(C_6H_{14})} = 7,3 + 0,1 T$$

$$C_{P(C_6H_6)} = - 0,28 + 0,08 T$$

$$C_{P(H_2)} = 6,9 - 0,0002 T$$



Tentukan ΔH^0 reaksi pada suhu 500 °C.

2.15. Entropi

Entropi (S) atau derajat ketidakteraturan atau kekacauan dalam suatu sistem secara khusus dapat dihitung menggunakan rumus yang dinyatakan oleh Ludwig Boltzmann (1869):

$$S = k \ln W \quad (2.52)$$

Dimana S adalah entropi sistem, k: tetapan Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$) dan W: banyaknya jalan agar energi sistem dapat dicapai dengan penyusunan ulang atom-atom atau molekul-molekul diantara keadaan-keadaan yang ada.

Contoh soal 2.14:

Hitung entropi 1 mol $CO_{(s)}$ pada $T = 0$ dengan asumsi setiap molekul CO dapat mengambil salah satu dari dua orientasi tanpa mempengaruhi energinya.

Jawaban:

$$1 \text{ mol CO} = 6,02 \times 10^{23} \text{ molekul CO}$$

$$W = 2 \times 2 \times \dots = 2^N$$

Entropi molekul CO

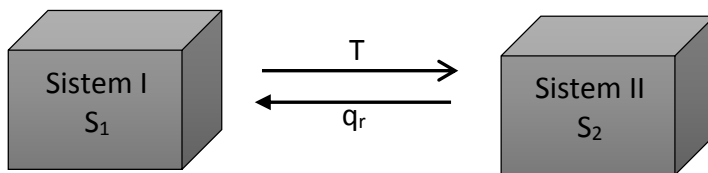
$$S = k \ln W = k \ln 2^N = Nk \ln 2$$

$$S = 6,02 \times 10^{23} \times 1,381 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1} \times \ln 2 = 5,76 \text{ JK}^{-1}$$

Latihan 2.14:

Hitung entropi 1 mol $FCIO_{3(s)}$ pada $T = 0$ dengan asumsi setiap molekul $FCIO_{3(s)}$ dapat mengambil salah satu dari empat orientasi tanpa mempengaruhi energinya.

2.15.1. Entropi Sistem



Gambar 2.4 Perubahan pada suhu tetap (*isothermal*) dan dapat balik (*reversible*) suatu sistem

Perubahan entropi (∂S) suatu sistem yang mengalami perubahan pada suhu tetap (*isothermal*) dan dapat balik (*reversible*) dapat dinyatakan:

$$\Delta S = \frac{q_{\text{rev}}}{T} \quad (2.53)$$

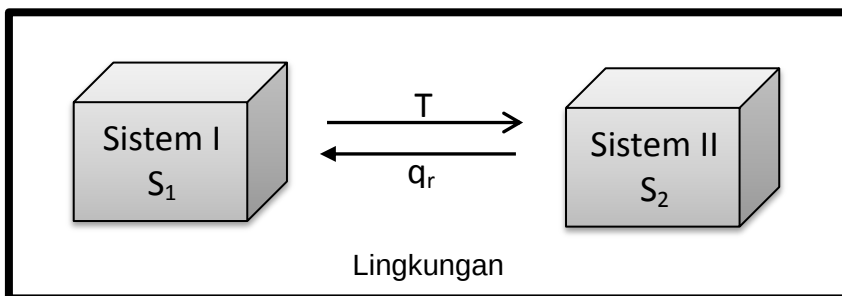
$$S_2 - S_1 = \frac{q_{\text{rev}}}{T} \quad (2.54)$$

Satuan entropi adalah sama dengan satuan tetapan Boltzmann (k) yaitu **Joule per Kelvin** atau JK^{-1} .

2.15.2. Entropi Lingkungan

Perhatikan Gambar 2.4, jika reaksi kimia berlangsung dalam sistem yang memiliki perubahan entalpi ΔH , kalor yang memasuki lingkungan pada tekanan tetap adalah $q_{\text{rev}} = -\Delta H$, sehingga perubahan entropi lingkungannya adalah

$$\Delta S = \frac{q_{\text{rev}}}{T} = -\frac{\Delta H}{T} \quad (2.55)$$



Gambar 2.4 Perubahan pada suhu tetap (*isothermal*) dan dapat balik (*reversible*) suatu sistem terisolasi

Contoh soal 2.15:

Entalpi pembentukan standar $\text{H}_2\text{O}_{(l)} = -285,8 \text{ kJ mol}^{-1}$, tentukan perubahan entropi lingkungannya

Jawaban:

$$\Delta S = -\frac{\Delta H}{T} = -\frac{-285,8 \text{ kJ mol}^{-1}}{298 \text{ K}} = +0,959 \text{ kJ K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

Latihan 2.15:

Diketahui data perubahan entalpi pembentukan standar NO_2 dan N_2O_4 berturut-turut 46,01 dan 92,01 kJ mol⁻¹. Tentukan perubahan entropi lingkungannya pada pembentukan 1 mol N_2O_4 dari 2 mol NO_2 .

Alam semesta meliputi sistem dan lingkungannya. Entropi alam semesta adalah hasil penjumlahan entropi sistem dan entropi lingkungannya. Perubahan entropi proses dialam semesta (ΔS_{al}) adalah hasil penjumlahan perubahan entropi sistem (ΔS_{sis}) dan perubahan entropi lingkungannya (ΔS_{ling}).

$$\Delta S_{\text{al}} = \Delta S_{\text{sis}} + \Delta S_{\text{ling}}$$

$$\Delta S_{\text{al}} = \frac{q_{\text{rev}}}{T} + \left(-\frac{\Delta H}{T} \right) \quad (2.57)$$

2.15.3. Perubahan Entropi untuk Sistem Terisolasi, pada Suhu Tetap (*isothermal*) dan Dapat Balik (*reversible*)

Perubahan entropi total untuk proses dialam semesta yang dilakukan pada keadaan terisolasi, suhu tetap (*isothermal*) dan dapat balik (*reversible*) adalah bernilai nol. Demikian juga perubahan entropi total dialam semesta untuk proses siklus bernilai nol.

$$0 = \frac{q_{\text{rev}}}{T} + \left(-\frac{\Delta H}{T} \right)$$

$$0 = \Delta S_{\text{sis}} + \left(-\frac{\Delta H}{T} \right)$$

$$\Delta S_{\text{sis}} = \left(\frac{\Delta H}{T} \right)$$

$$\partial S_{\text{sis}} = \left(\frac{\partial H}{T} \right)$$

Menentukan perubahan entropi sistem yang berubah dari keadaan awal ke keadaan akhir pada temperatur tetap (*isothermal*).

$$\begin{aligned}\partial S_{\text{sis}} &= \frac{\partial q_{\text{rev}}}{T} \\ \int_i^f \partial S_{\text{sis}} &= \int_i^f \frac{\partial q_{\text{rev}}}{T} \\ \Delta S_{\text{sis}} &= \int_i^f \frac{\partial q_{\text{rev}}}{T} = \frac{1}{T} \int_i^f \partial q_{\text{rev}} = \frac{q_{\text{rev}}}{T}\end{aligned}\quad (2.58)$$

Proses pada temperatur tetap (*isothermal*) $\partial U=0$

Hukum termodinamika pertama $\partial U = \partial q + \partial w$, karena $\partial U=0$, maka:

$$\partial q_{\text{rev}} = - \partial w$$

$$\partial q_{\text{rev}} = - (-P\partial V)$$

$$\partial q_{\text{rev}} = (P\partial V)$$

$$\begin{aligned}\int_i^f \partial q_{\text{rev}} &= \int_i^f P\partial V \\ q_{\text{rev}} &= \int_i^f \frac{nRT}{V} \partial V = nRT \ln \frac{V_f}{V_i}\end{aligned}\quad (2.59)$$

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{sis}} &= \frac{q_{\text{rev}}}{T} = \frac{nRT \ln \frac{V_f}{V_i}}{T} = nR \ln \frac{V_f}{V_i} \\ \Delta S_{\text{sis}} &= nR \ln \frac{V_f}{V_i}\end{aligned}\quad (2.60)$$

Contoh soal 2.16:

Tentukan nilai perubahan entropi jika 1 mol gas sempurna memuai secara *isothermal* sampai volumenya menjadi dua kali volume semula.

Jawaban:

$$\begin{aligned}q_{\text{rev}} &= nRT \ln \frac{V_f}{V_i} \\ \Delta S_{\text{sis}} &= \frac{q_{\text{rev}}}{T} = \frac{nRT \ln \frac{V_f}{V_i}}{T} = nR \ln \frac{V_f}{V_i} \\ \Delta S_{\text{sis}} &= nR \ln \frac{V_f}{V_i}\end{aligned}$$

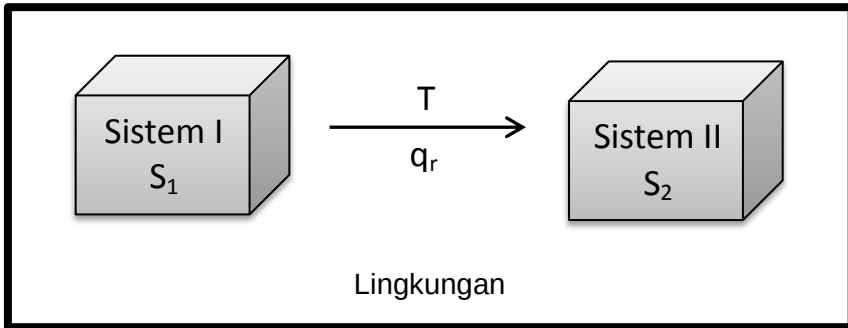
$$\Delta S_{\text{sis}} = 1 \text{ mol} \times 8,314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1} \times \ln 2 = +5,76 \text{ JK}^{-1}$$

Latihan 2.16:

Rumuskan nilai perubahan entropi jika gas sempurna melakukan proses dari tekanan awal menjadi tekanan akhir.

2.15.4. Perubahan Entropi untuk Sistem Terisolasi, pada Proses Suhu Tetap (Isothermal) dan Tidak Dapat Balik (Irreversible)

Ilustrasi perubahan *isothermal* dan *irreversible* suatu sistem terisolasi dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Perubahan *isothermal* dan *irreversible* suatu sistem terisolasi

Perubahan entropi sistem terisolasi (ΔS_{sis}), untuk proses pada suhu tetap (*isothermal*) dan tidak dapat balik (*irreversible*) adalah sama dengan proses pada suhu tetap (*isothermal*) dan dapat balik (*reversible*).

$$\Delta S_{\text{sis}} = \frac{q_{\text{rev}}}{T} \quad (2.61)$$

Perubahan entropi lingkungan (ΔS_{ling}), untuk pada suhu tetap (*isothermal*) dan tidak dapat balik (*irreversible*) adalah:

$$\Delta S_{\text{ling}} = \frac{q}{T} \quad (2.62)$$

dimana q adalah panas yang diserap sistem. Karena harga $q < q_{\text{rev}}$, maka harga perubahan entropi total akan bernilai lebih dari nol.

$$\frac{q_{\text{rev}}}{T} > \frac{q}{T} \quad (2.63)$$

$$\Delta S_{as} = \Delta S_{sis} + \Delta S_{ling} > 0$$

$$\partial S_{sis} + \partial S_{ling} > 0$$

$$\partial S_{sis} > -\partial S_{ling} \quad (2.64)$$

$$\partial S_{sis} > -\frac{\partial q}{T} \quad (2.65)$$

Perubahan entropi suatu proses siklus A - B - A, adalah sama dengan nol

$$\oint_A^A \partial S = \int_A^B \partial S + \int_B^A \partial S = 0 \quad (2.66)$$

$$\Delta S = S_B - S_A + S_A - S_B = 0$$

Karena $\partial S = \frac{\partial q}{T}$, maka;

$$\oint \partial S = \int_A^B \frac{\partial q_{rev}}{T} + \int_B^A \frac{\partial q_{rev}}{T} = 0 \quad (2.67)$$

Nilai $\int_A^B \frac{\partial q_{rev}}{T}$ tidak bergantung pada jalan yang ditentukan tetapi tergantung pada keadaan awal A dan akhir B.

2.16. Hukum Kedua Termodinamika

Dari kedua proses diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa perubahan entropi total untuk proses-proses terisolasi:

$$\Delta S \geq 0 \quad (2.68)$$

$\Delta S = 0$, untuk proses terisolasi dapat balik (*reversible*) pada *isothermal* dan *non isothermal*

$\Delta S > 0$, untuk proses terisolasi tidak dapat balik (*irreversible*) pada *isothermal* dan *non isothermal*

Proses-proses terisolasi dapat balik (*reversible*) selalu berjalan sangat lambat dan lama, sebaliknya proses-proses terisolasi *irreversible* terjadi dengan waktu yang cepat dan pendek, diikuti dengan kenaikan entropi dari sistem dan lingkungannya atau hanya entropi sistem saja. Formulasi **hukum termodinamika ke dua** dapat dinyatakan:

“Semua proses atau reaksi spontan yang terjadi dialam semesta pada sistem terisolasi, selalu disertai bertambahnya entropi”.

$$\Delta S_{as} > 0 \quad (2.69)$$

$$\Delta S + \Delta S_l > 0 \quad (2.70)$$

dengan ΔS adalah perubahan entropi sistem (dimana terjadi proses atau reaksi kimia) dan ΔS_l adalah perubahan entropi lingkungan.

2.17. Perubahan Entropi untuk Gas Sempurna

Penentuan perubahan entropi untuk gas sempurna lebih sederhana, sebab pada **proses pada suhu tetap (isothermal)** untuk pada gas sempurna:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = 0 \quad (2.71)$$

Proses dapat balik (*reversible*) untuk gas sempurna akan berlaku hukum termodinamika pertama:

$$\partial U = \partial q - P \partial V$$

$$\partial q = \partial U + P \partial V$$

Karena $\partial U = C_V \partial T$, maka:

$$\partial q = C_V \partial T + P \partial V \quad (2.72)$$

Persamaan gas sempurna untuk 1 mol gas berlaku:

$$P V = 1 \times R T$$

$$P = \frac{R T}{V}$$

Maka selanjutnya

$$\partial q = C_V \partial T + \frac{R T}{V} \partial V$$

Perubahan entropi untuk gas sempurna dapat diformulasikan:

$$\partial S = \frac{\partial q}{T}$$

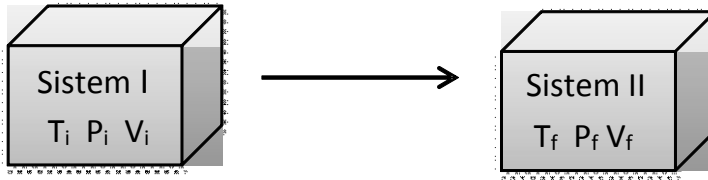
$$\partial S = \frac{C_V \partial T}{T} + \frac{R T}{V T} \partial V$$

$$\partial S = \frac{C_V}{T} \partial T + \frac{R}{V} \partial V$$

$$\int_i^f \partial S = \int_i^f \frac{C_V}{T} \partial T + \int_i^f \frac{R}{V} \partial V$$

$$\Delta S = S_f - S_i = C_V \ln \frac{T_f}{T_i} + R \ln \frac{V_f}{V_i} \quad (2.73)$$

Jika sistem dengan parameter T , P dan V , berubah dari keadaan I ke keadaan II seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.6. Perubahan entropinya dapat dikaitkan dengan hukum Boyle-Gay Lussac.



Gambar 2.6 keadaan sistem pada parameter T , P dan V

Menurut hukum Boyle - Gay Lussac;

$$\frac{P_i V_i}{T_i} = \frac{P_f V_f}{T_f} \quad (2.74)$$

$$\frac{V_f}{V_i} = \frac{P_i T_f}{P_f T_i}$$

Sehingga persamaan perubahan entropi menjadi

$$\Delta S = S_f - S_i = C_V \ln \frac{T_f}{T_i} + R \ln \frac{P_i T_f}{P_f T_i}$$

$$\Delta S = S_f - S_i = C_V \ln \frac{T_f}{T_i} + R \ln \frac{P_i}{P_f} + R \ln \frac{T_f}{T_i}$$

$$\Delta S = S_f - S_i = (C_V + R) \ln \frac{T_f}{T_i} + R \ln \frac{P_i}{P_f}$$

Sebelumnya kita mengenal $C_P - C_V = R$ atau $C_V + R = C_P$, maka;

$$\Delta S = S_f - S_i = C_P \ln \frac{T_f}{T_i} + R \ln \frac{P_i}{P_f}$$

Persamaan perubahan entropi untuk n mol gas sempurna:

$$\Delta S = n C_V \ln \frac{T_f}{T_i} + n R \ln \frac{V_f}{V_i} \quad \text{dan} \quad \Delta S = n C_P \ln \frac{T_f}{T_i} - n R \ln \frac{P_f}{P_i} \quad (2.75)$$

Dari persamaan (2.75) didapatkan tiga kesimpulan keadaan istimewa untuk menentukan perubahan entropi gas sempurna:

a) Perubahan entropi gas sempurna pada temperatur tetap

$$\Delta S = n R \ln \frac{V_f}{V_i} = -n R \ln \frac{P_f}{P_i} \quad (2.76)$$

b) Perubahan entropi gas sempurna pada tekanan tetap

$$\begin{aligned}\partial S &= n C_P \cdot \frac{1}{T} \partial T \\ \int \partial S &= \int_{T_i}^{T_f} n C_P \cdot \frac{1}{T} \partial T \\ \Delta S &= n C_P \int_{T_i}^{T_f} \frac{1}{T} \partial T \\ \Delta S &= n C_P \ln \frac{T_f}{T_i}\end{aligned}\quad (2.77)$$

c) Perubahan entropi gas sempurna pada volume tetap

$$\Delta S = n C_V \ln \frac{T_f}{T_i} \quad (2.78)$$

Contoh soal 2.17:

1 mol gas sempurna memiliki $C_V = 3 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, temperaturnya dinaikan menjadi dua kali semula pada proses volume tetap.

Jawaban:

Jika temperatur awal T_i , maka temperatur akhir nya $T_f = 2 T_i$. karena proses berlangsung pada volume tetap atau $V_f = V_i$, jadi perubahan entropinya:

$$\begin{aligned}\Delta S &= S_f - S_i = C_V \ln \frac{T_f}{T_i} + R \ln \frac{V_f}{V_i} \\ \Delta S &= 3 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1} \ln \frac{2T_i}{T_i} + 8,314 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1} \ln 1 \\ \Delta S &= 3 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1} \ln 2 = 2,08 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}\end{aligned}$$

Latihan 2.17:

1 mol gas sempurna melakukan ekspansi pada temperatur tetap (*isothermal*) sampai volumenya menjadi dua kali volume semula. Tentukan perubahan entropi gas sempurna tersebut.

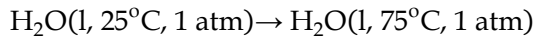
2.18. Perhitungan Perubahan Entropi

2.18.1. Proses yang Tidak Disertai Perubahan Fasa

Contoh soal 2.18:

Pada tekanan 1 atm, tentukan perubahan entropi dari proses air pada suhu 25°C dinaikan suhunya menjadi 75°C. (C_P air = 75,6 JK⁻¹mol⁻¹).

Jawaban:



$$\Delta S = S_f - S_i = C_P \ln \frac{T_f}{T_i}$$

$$\Delta S = 75,6 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1} \ln \frac{348}{298} = 11,7 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

Latihan 2.18:

Pada volume tetap, 1 mol air suhu 27°C dinaikan suhunya menjadi 73°C, tentukan perubahan entropinya.

2.18.2. Proses Dapat Balik (*revesibel*) yang Disertai Perubahan Fasa

Perubahan fasa suatu zat terjadi pada suhu dan tekanan tetap atau berlangsung secara isothermal dan isobaric. Perubahan entropi dari proses yang disertai perubahan fasa dapat ditentukan berdasarkan Aturan Trouton:

$$\partial S = \frac{\partial q_{\text{rev}}}{T} = \frac{\partial H}{T} = \frac{\Delta H}{T}$$

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T} \quad (2.79)$$

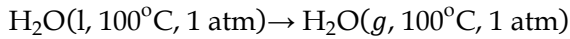
$$\Delta S_{\text{uap}} = \frac{\Delta H_{\text{uap}}}{T_b} \text{ atau } \Delta H_{\text{uap}} = \Delta S_{\text{uap}} \times T_b$$

ΔS_{uap} adalah perubahan entropi pada proses penguapan cairan, ΔH_{uap} adalah panas penguapan dan T_b adalah titik didih cairan. Jadi panas yang menyertahi perubahan fasa dapat dihitung secara kira-kira. Penyimpangan dapat terjadi pada zat yang mempunyai interaksi intramolekul yang kuat.

Contoh soal 2.19:

Tentukan perubahan entropi yang menyertai proses penguapan air pada tekanan 1 atm, jika kalor penguapan air (ΔH_V) = 40,77 kJ mol⁻¹.

Jawaban:



$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T} = \frac{40.770 \text{ J mol}^{-1}}{373 \text{ K}} = 109,3 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

Latihan 2.19:

Tentukan perubahan entropi yang menyertai proses penguapan karbon tetra klorida (CCl_4) pada tekanan 1 atm, jika kalor penguapan CCl_4 (ΔH_V) = 30 kJ mol^{-1} .

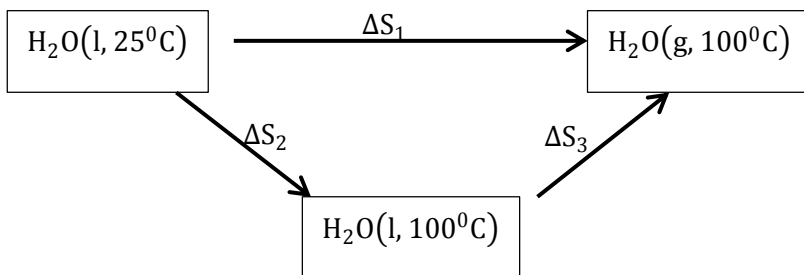
2.18.3. Proses Tidak Dapat Balik (*irreversible*) yang Disertai Perubahan Fasa

Jika sistem A berubah menjadi B berlangsung tak dapat balik (*irreversible*), perubahan entropi yang menyertainya dapat dihitung dengan cara membagi jalan yang ditempuh perubahan sistem A ke B menjadi beberapa langkah atau tingkatan yang masing-masing langkah adalah proses yang dapat balik (*reversible*).

Contoh soal 2.20:

Pada tekanan 1 atm, tentukan perubahan entropi yang menyertai proses perubahan air 25°C menjadi uap air 100°C . jika diketahui kalor penguapan air (ΔH_V) = $40,77 \text{ kJ mol}^{-1}$ dan $C_p \text{ air} = 75,6 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$.

Jawaban:



$$\Delta S_1 = \Delta S_2 + \Delta S_3$$

$$\Delta S_1 = C_p \ln \frac{T_f}{T_i} + \frac{\Delta H_V}{T}$$

$$\Delta S_1 = 75,6 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1} \ln \frac{373}{298} + \frac{40,77 \text{ kJ mol}^{-1}}{373}$$

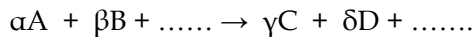
$$\Delta S_1 = 17,0 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1} + 109,3 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1} = 126,3 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

Latihan 2.20:

1 mol air didinginkan lanjut (*supercooled*) membeku pada suhu -10°C . Jika kalor jenis air 1 kalori/der.gram, kalor jenis es 0,5 kalori/der.gram dan kalor pencairan es pada 0°C adalah 80 kalori/gram. Hitunglah perubahan entropi untuk pembekuan air yang didinginkan lanjut tersebut.

2.18.4. Perubahan Entropi pada Reaksi Kimia

Perubahan entropi yang menyertai reaksi kimia didefinisikan sebagai perbedaan antara jumlah entropi dari zat-zat hasil reaksi (*product*) dan jumlah entropi dari semua zat pereaksi (*reactant*). Perhatikan reaksi berikut:



perubahan entropi yang menyertai reaksi kimia tersebut dapat dituliskan:

$$\Delta S = \sum S_{\text{hasil reaksi}} - \sum S_{\text{pereaksi}} \quad (2.80)$$

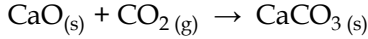
$$\Delta S = \gamma \cdot S_C + \delta \cdot S_D + \dots - \alpha \cdot S_A - \beta \cdot S_B - \dots \quad (2.81)$$

dimana S_A, S_B, S_C, S_D adalah entropi per mol dari setiap jenis zat. Entropi setiap zat dapat ditentukan melalui hukum ketiga termodinamika atau secara statistik dengan menggunakan data spektroskopi. Hasil perhitungan entropi setiap zat diberikan dalam keadaan standar pada 25°C .

$$\Delta S = \gamma \cdot S_C^\theta + \delta \cdot S_D^\theta + \dots - \alpha \cdot S_A^\theta - \beta \cdot S_B^\theta - \dots \quad (2.82)$$

Contoh soal 2.21:

Diketahui data entropi standar dari CaO, CO_2 dan CaCO_3 berturut-turut adalah 38,8; 213,6; dan $92,9 \text{ JK}^{-1}$. Tentukan perubahan entropi dari reaksi:



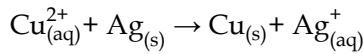
Jawaban:

$$\Delta S = S_{\text{CaCO}_{3(s)}}^{\theta} - S_{\text{CaO}_{(s)}}^{\theta} - S_{\text{CO}_{2(g)}}^{\theta}$$

$$\Delta S = 92,9 - 38,8 - 213,6 = -160,5 \text{ JK}^{-1}$$

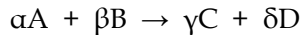
Latihan 2.21:

Diketahui data entropi standar dari Cu, Cu²⁺, Ag dan Ag⁺ berturut-turut adalah 33, -100, 43 dan 73 JK⁻¹. Hitunglah perubahan entropi standar dari reaksi:



2.19. Kebergantungan Entropi pada Temperatur

Perhatikan reaksi berikut:



perubahan entropi yang menyertai reaksi kimia tersebut dapat dituliskan:

$$\Delta S = \sum S_{\text{hasil reaksi}} - \sum S_{\text{pereaksi}} \quad (2.83)$$

$$\Delta S = \gamma \cdot S_C + \delta \cdot S_D - \alpha \cdot S_A - \beta \cdot S_B \quad (2.84)$$

Jika persamaan diatas didiferensialkan dengan perubahan temperatur dan tekanan tetap maka akan didapatkan:

$$\left(\frac{\partial(\Delta S)}{\partial T} \right)_P = \left[\gamma \cdot \left(\frac{\partial S_C}{\partial T} \right)_P + \delta \cdot \left(\frac{\partial S_D}{\partial T} \right)_P - \alpha \cdot \left(\frac{\partial S_A}{\partial T} \right)_P - \beta \cdot \left(\frac{\partial S_B}{\partial T} \right)_P \right]$$

Sebelumnya kita telah mengenal harga $\left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_P = \frac{C_P}{T}$

Selanjutnya:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial(\Delta S)}{\partial T} \right)_P &= \left[\gamma \cdot \frac{C_{PC}}{T} + \delta \cdot \frac{C_{PD}}{T} - \alpha \cdot \frac{C_{PA}}{T} - \beta \cdot \frac{C_{PB}}{T} \right] \\ \left(\frac{\partial(\Delta S)}{\partial T} \right)_P &= \left[\frac{(\gamma \cdot C_{PC} + \delta \cdot C_{PD})}{T} - \frac{(\alpha \cdot C_{PA} + \beta \cdot C_{PB})}{T} \right] \\ \left(\frac{\partial(\Delta S)}{\partial T} \right)_P &= \left[\frac{\Delta C_P}{T} \right] \end{aligned} \quad (2.85)$$

Dimana ΔC_P adalah perbedaan antara C_P zat hasil reaksi dan zat pereaksi. Persamaan diatas bila diintegrasikan diantara batas T_i dan T_f , maka:

$$\int_{S_i}^{S_f} \partial(\Delta S) = \int_{T_i}^{T_f} \frac{\Delta C_P}{T} \partial T$$

$$\Delta S_f - \Delta S_i = \int_{T_i}^{T_f} \frac{\Delta C_P}{T} \partial T \quad (2.86)$$

Dimana ΔS_f adalah perubahan entropi pada ΔT_f dan ΔS_i adalah perubahan entropi pada ΔT_i .

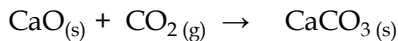
Kalau ΔC_P adalah merupakan bilangan konstan, maka:

$$\Delta S_f - \Delta S_i = \int_{T_i}^{T_f} \frac{\Delta C_P}{T} \partial T$$

$$\Delta S_f - \Delta S_i = \Delta C_P \ln \frac{T_f}{T_i} \quad (2.87)$$

Contoh soal 2.22:

Diketahui data C_P dari CaCO_3 , CaO dan CO_2 berturut-turut 81,9; 42,8 dan 37,1 $\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ dan data ΔS_{298}^θ adalah $-160,5 \text{ JK}^{-1}$. Tentukan perubahan entropi untuk reaksi berikut pada suhu 500K.



Jawaban:

$$\Delta C_P = C_P (\text{CaCO}_{3(s)}) - C_P (\text{CaO}_{(s)}) - C_P (\text{CO}_{2(g)})$$

$$\Delta C_P = 81,9 - 42,8 - 37,1 = 2 \text{ JK}^{-1}$$

$$\Delta S_f - \Delta S_i = \Delta C_P \ln \frac{T_f}{T_i}$$

$$\Delta S_{500} - \Delta S_{298} = 2 \text{ JK}^{-1} \ln \frac{500}{298}$$

$$\Delta S_{500} - (-160,5) \text{ JK}^{-1} = 2 \text{ JK}^{-1} \ln \frac{500}{298}$$

$$\Delta S_{500} = -160,5 \text{ JK}^{-1} + 2 \text{ JK}^{-1} \ln \frac{500}{298} = -159,5 \text{ JK}^{-1}$$

Entropi tergantung pada variabel-variabel sistem. Kalau entropi sebagai fungsi dari keadaan sistem, harga entropi untuk suatu zat

murni akan tergantung pada 2 dari tiga variabel: T , V, dan P. Umumnya variabel T dipilih sebagai variabel bebas kemudian baru variabel P atau V. Jadi kesimpulan ada dua fungsi entropi yaitu entropi sebagai fungsi temperatur dan volume $S = f(T,V)$ dan entropi sebagai fungsi temperatur dan tekanan $S = f(T,P)$.

2.20. Hubungan Perubahan Entropi dengan Temperatur pada Tekanan Tetap

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_P = \left[\frac{C_P}{T} \right] \quad (2.88)$$

Pembuktian persamaan (2.88), hubungan perubahan entropi dengan temperatur pada tekanan tetap.

Entropi sebagai fungsi temperatur dan tekanan:

$$S = f(T,P)$$

Hasil integralnya:

$$\partial S = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_P \partial T + \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T \partial P \quad (2.89)$$

Jika $H = U + P.V$; maka hasil differential sempurnanya:

$$\partial H = \partial U + P\partial V + V\partial P$$

$$\partial H - V\partial P = \partial U + P\partial V$$

Hukum termodinamika pertama

$$\partial U = \partial q + \partial W$$

$$\partial U = \partial q - P\partial V$$

dikarena $\partial S = \frac{\partial q}{T}$, maka:

$$\partial U = T.\partial S - P.\partial V$$

$$\partial H - V\partial P = T.\partial S - P.\partial V + P\partial V$$

$$\partial H - V\partial P = T.\partial S \quad (2.90)$$

Jika H adalah fungsi temperatur dan tekanan, maka dapat dinyatakan sebagai persamaan:

$$H = f(T,P)$$

Jika persamaan tersebut dideferensialkan terhadap temperatur pada tekanan tetap dan terhadap tekanan pada temperatur tetap, akan diperoleh:

$$\partial H = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \partial T + \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T \partial P \quad (2.91)$$

Persamaan (2.91) setelah disubstitusikan kedalam persamaan (2.90) akan diperoleh:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \partial T + \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T \partial P - V \partial P = T \partial S \quad (2.92)$$

Persamaan (2.92) ruas kanan dan kiri dibagi dengan T, sehingga didapatkan:

$$\frac{1}{T} \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \partial T + \frac{1}{T} \left[\left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T - V \right] \partial P = \partial S \quad (2.93)$$

Sebelumnya pada persamaan (2.18) telah dikemukakan:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P = C_P$$

Untuk gas sempurna berlaku $\left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T = 0$

$$\frac{1}{T} \left[\left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T - V \right] \partial P = - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \partial P$$

$$- \frac{V}{T} \partial P = - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \partial P$$

Jadi setelah $\left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P = C_P$ dan $\frac{1}{T} \left[\left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T - V \right] \partial P = - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \partial P$,

disubstitusikan kedalam persamaan (2.93) akan diperoleh:

$$\frac{1}{T} \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P \partial T + \frac{1}{T} \left[\left(\frac{\partial H}{\partial P} \right)_T - V \right] \partial P = \partial S$$

$$\frac{1}{T} C_P \partial T + \frac{1}{T} [0 - V] \partial P = \partial S$$

$$\frac{C_P}{T} \partial T - \frac{V}{T} \partial P = \partial S$$

$$\frac{C_P}{T} \partial T - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \partial P = \partial S \quad (2.94)$$

Sebelumnya diinformasikan

$$\partial S = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_P \partial T + \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T \partial P$$

Jadi

$$\frac{C_P}{T} \partial T - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \partial P = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_P \partial T + \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T \partial P$$

Secara matematika dapat disimpulkan:

$$\begin{aligned} - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \partial P &= \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T \partial P \\ - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P &= \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T \end{aligned} \quad (2.95)$$

dan

$$\begin{aligned} \frac{C_P}{T} \partial T &= \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_P \partial T \\ \frac{C_P}{T} &= \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_P \end{aligned} \quad (2.96)$$

2.21. Entropi Absolut

Entropi absolut dihitung pada temperatur 25 °C dan tekanan 1 atm. Persamaan entropi absolut dapat ditentukan berdasarkan hubungan persamaan (2.96) yaitu jika S_0 berharga nol, maka S_T disebut entropi absolut dari suatu zat. Entropi absolut dapat dirumuskan dari persamaan (2.96) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{C_P}{T} \partial T &= \partial S \\ \int_0^T \frac{C_P}{T} \partial T &= \int_{S_0}^{S_T} \partial S \\ \int_0^T \frac{C_P}{T} \partial T &= S_T - S_0 \\ C_P \ln T &= S_T - S_0 \end{aligned}$$

$$2,303 C_p \log T = S_T - S_0 \text{ karena } S_0 = 0$$

$$C_p \ln T = 2,303 C_p \log T = S_T \tag{2.97}$$

Berikut disampaikan daftar entropi absolut standart pada temperatur 25°C dari berbagai unsur dan senyawa.

Tabel 2.1 Entropi absolut standar dari unsur-unsur dan senyawa-senyawa pada temperatur 25°C

Zat	S ⁰ (kalori K ⁻¹ mol ⁻¹)	Zat	S ⁰ (kalori K ⁻¹ mol ⁻¹)
H ₂ (gas)	31,21	H ₂ O (cair)	16,72
C (diamond)	0,583	H ₂ O (gas)	45,11
C (grafit)	1,36	CO (gas)	47,30
N ₂ (gas)	45,77	CO ₂ (gas)	51,06
O ₂ (gas)	49,00	HgCl ₂ (solid)	34,6
Na (solid)	12,2	HgCl (solid)	23,5
Mg (solid)	7,77	CuI (solid)	23,1
S (rhombis)	7,62	AgCl (solid)	22,97
S (monoklin)	7,78	AgI (solid)	27,6
Cl (gas)	53,29	Fe ₂ O ₃ (solid)	21,5
Fe (solid)	6,49	MgO (solid)	6,55
Cu (solid)	7,97	NaCl (solid)	17,3
Br (gas)	58,64	C ₂ H ₆ (gas)	54,85
Ag (solid)	10,21	CH ₃ OH (liquid)	30,3
I ₂ (solid)	27,9	C ₂ H ₅ OH	38,4
I ₂ (gas)	62,29	(liquid)	41,30
Hg (liquid)	18,5	C ₆ H ₆ (liquid)	34
Hg (gas)	41,8	C ₆ H ₅ OH	38,2
		(liquid)	
		CH ₃ COOH	
		(liquid)	

2.22. Hubungan Perubahan Entropi Dengan Temperatur pada Volume Tetap

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V = \left[\frac{C_V}{T} \right] \quad (2.98)$$

Entropi tergantung pada variabel sistem. Jika entropi sebagai fungsi dari keadaan sistem, maka harga entropi untuk suatu zat murni akan tergantung pada 2 dari variabel: T, V dan P. Umumnya T dipilih sebagai variabel bebas kemudian baru variabel P atau V. Jadi ada 2 kesimpulan, yaitu:

- 1) Entropi tergantung pada fungsi T dan V
- 2) Entropi tergantung pada fungsi T dan P

Pembuktian hubungan entropi dengan temperatur pada volume tetap atau persamaan (2.98), dapat diawali dari entropi sebagai fungsi temperatur dan volume.

$$S = f(T, V)$$

Setelah diturunkan (*differential*) terhadap T berubah, V tetap dan terhadap V berubah, T tetap akan diperoleh persamaan:

$$\partial S = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V \partial T + \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T \partial V \quad (2.99)$$

Menurut hukum termodinamika pertama:

$$\partial U = \partial q + \partial W$$

Sedangkan

$$\partial S = \frac{\partial q}{T} \text{ dan } \partial W = -P \cdot \partial V$$

$$\partial U = T \cdot \partial S - P \cdot \partial V \quad (2.100)$$

Karena energi dalam adalah fungsi temperatur dan volume, maka setelah diturunkan (*differential*) terhadap temperatur berubah, volume tetap dan terhadap volume berubah, temperatur tetap, hasilnya dapat dituliskan:

$$\partial U = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V \partial T + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \partial V \quad (2.101)$$

Setelah persamaan (2.100) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.101) akan diperoleh:

$$\begin{aligned}
 T.\partial S - P.\partial V &= \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V \partial T + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \partial V \\
 T.\partial S &= \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V \partial T + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \partial V + P.\partial V \\
 \partial S &= \frac{1}{T}\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V \partial T + \frac{1}{T}\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \partial V + \frac{P}{T}.\partial V \quad (2.102)
 \end{aligned}$$

Sebelumnya diketahui: $\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V = C_V$ dan $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = 0$, maka setelah disubstitusikan ke dalam persamaan (2.102) didapatkan:

$$\begin{aligned}
 \partial S &= \frac{C_V}{T} \partial T + 0 + \frac{P}{T}.\partial V \\
 \partial S &= \frac{C_V}{T} \partial T + \frac{P}{T}.\partial V \\
 \partial S &= \frac{C_V}{T} \partial T + \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V \partial V \quad (2.103)
 \end{aligned}$$

Sebelumnya diketahui persamaan (2.99) dinyatakan:

$$\partial S = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V \partial T + \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T \partial V$$

Setelah persamaan (2.99) dan (2.103) disetarakan:

$$\frac{C_V}{T} \partial T + \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V \partial V = \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V \partial T + \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T \partial V \quad (2.104)$$

Selanjutnya didapatkan hubungan:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V = \frac{C_V}{T} \quad \text{dan} \quad \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V \quad (2.105)$$

2.23. Entropi Campuran Gas Sempurna

Kalau ada dua atau lebih gas sempurna yang mempunyai tekanan sebesar P , jika gas-gas tersebut dicampur menjadi satu sehingga menjadi satu keadaan yaitu pada temperatur dan tekanan yang tetap, pencampuran gas-gas tersebut akan terjadi secara

spontan. Proses yang tetap ini ditunjukkan dengan penambahan entropi. Penambahan entropinya dapat dihitung sebagai berikut: Pada saat gas-gas tersebut dicampur maka tekanan masing-masing gas (tekanan partial masing-masing gas) dapat dihitung:

Missal:

Gas I setelah bercampur tekanan partialnya $P_1 = x_1 \cdot P$

P_1 adalah tekanan partial gas I

x_1 adalah mol fraksi gas I

Gas II setelah bercampur tekanan partialnya $P_2 = x_2 \cdot P$

P_2 adalah tekanan partial gas II

x_2 adalah mol fraksi gas II

Besarnya perubahan entropi campurannya adalah sama dengan penambahan entropi campuran gas yaitu jumlah dari masing-masing gas untuk ekspansi dari tekanan awal P sampai dengan tekanan akhir (tekanan partial masing-masing gas).

$$\Delta S_{\text{Campuran}} = x_1 R \ln \frac{P}{P_1} + x_2 R \ln \frac{P}{P_2} \quad (2.106)$$

$$\Delta S_{\text{Campuran}} = x_1 R \ln \frac{P}{x_1 \cdot P} + x_2 R \ln \frac{P}{x_2 \cdot P}$$

$$\Delta S_{\text{Campuran}} = x_1 R \ln \frac{1}{x_1} + x_2 R \ln \frac{1}{x_2}$$

$$\Delta S_{\text{Campuran}} = R \left(x_1 \ln \frac{1}{x_1} + x_2 \ln \frac{1}{x_2} \right)$$

$$\Delta S_{\text{Campuran}} = -R (x_1 \ln x_1 + x_2 \ln x_2) \quad (2.107)$$

Secara umum bila dalam campuran gas yang terdiri dari i macam gas maka penambahan entropi campurannya dapat dinyatakan sebagai persamaan:

$$\Delta S_{\text{Campuran}} = -R \sum_i x_i \ln x_i \quad (2.108)$$

$$\sum_i x_i \ln x_i = x_1 \ln x_1 + x_2 \ln x_2 + x_3 \ln x_3 + x_4 \ln x_4 + \dots \quad (2.109)$$

Persamaan tersebut dapat digunakan juga untuk larutan yang berasal dari zat cair dan zat padat.

Contoh soal 2.23:

Hitunglah entropi campuran dari unsur-unsur penyusun udara yang terdiri dari 79% N₂, 20% O₂ dan 1 % Ar.

Jawaban:

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{Campuran}} &= -R (x_{N_2} \ln x_{N_2} + x_{O_2} \ln x_{O_2} + x_{Ar} \ln x_{Ar}) \\ \Delta S_{\text{Campuran}} &= \\ &- 8,314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1} (0,79 \ln 0,79 + 0,20 \ln 0,20 + 0,01 \ln 0,01) \\ \Delta S_{\text{Campuran}} &= - 8,314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1} (-0,6933) = 5,764 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}\end{aligned}$$

Latihan 2.23:

Hitunglah perubahan entropi bila gas N₂, H₂ dan NH₃ dicampur sehingga membentuk komposisi akhir 20% N₂, 50% H₂ dan 30% NH₃.

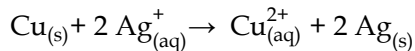
2.24. Perubahan Entropi Sebagai Indikator Kespontanan Reaksi

Kespontanan suatu proses atau reaksi kimia dapat diidentifikasi menggunakan nilai perubahan entropi yang menyertainya.

$$\Delta S_{\text{alam semesta}} = \Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{Lingkungan}} > 0 \quad (2.110)$$

Contoh soal 2.24:

Sejumlah serbuk tembaga ditambahkan kedalam larutan perak nitrat dalam tabung reaksi. Jika diketahui data $S_{\text{Cu}^{2+}}^{\theta}$, S_{Ag}^{θ} , $S_{\text{Ag}^{+}}^{\theta}$, dan S_{Cu}^{θ} berturut-turut -99,6; 42,6; 72,7 dan 33,3 JK⁻¹ dan data ΔH_f^{θ} , dari Cu²⁺ dan Ag⁺ berturut-turut 64,8 dan 105,6 kJ, Perkirakan apakah reaksi serbuk tembaga dengan larutan perak nitrat menurut reaksi dibawah ini berlangsung spontan pada suhu 298K.:



Jawaban:

Menghitung perubahan entropi sistem:

$$\begin{aligned}\Delta S &= S_{\text{Cu}^{2+}}^{\theta} + 2.S_{\text{Ag}}^{\theta} - 2 . S_{\text{Ag}^{+}}^{\theta} - S_{\text{Cu}}^{\theta} \\ \Delta S &= - 99,6 + 2 (42,6) - 2 (72,7) - 33,3 = - 19,30 \text{ JK}^{-1}\end{aligned}$$

Menghitung perubahan entropi lingkungan:

$$\Delta S_l = \frac{-\Delta H}{T}$$

$$\Delta H = \Delta H_f^\theta(\text{Cu}^{2+}) - 2.\Delta H_f^\theta(\text{Ag}^+)$$

$$\Delta H = \Delta H_f^\theta(\text{Cu}^{2+}) - 2.\Delta H_f^\theta(\text{Ag}^+)$$

$$\Delta H = 64,8 - 2. 105,6 = -146,4 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_l = \frac{-(-146,4)\text{kJ}}{298 \text{ K}} = \frac{146400 \text{ J}}{298 \text{ K}} = 491,3 \text{ JK}^{-1}$$

Menghitung perubahan entropi alam semesta (ΔS_{as})

$$\Delta S_{as} = \Delta S + \Delta S_l$$

$$\Delta S_{as} = -19,30 \text{ JK}^{-1} + 491,3 \text{ JK}^{-1} = 298,3 \text{ JK}^{-1}$$

Kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan nilai (ΔS_{as}) = $298,3 \text{ JK}^{-1}$, bernilai positif maka diprediksi reaksi serbuk tembaga didalam larutan perak nitrat berlangsung spontan.

Latihan 2.24:

Diketahui data S^θ dari $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$ dan $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$ berturut-turut 188,7 dan $70 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$. Perkirakan reaksi berikut pada suhu kamar berlangsung spontan atau tidak.



2.25. Perubahan Entropi Sebagai Indikator Kestimbangan Reaksi

Semua reaksi dalam semesta selalu disertai dengan meningkatnya entropi, yaitu $\Delta S_{as} > 0$ atau $\Delta S + \Delta S_l > 0$. Semua reaksi akan mencapai kesetimbangan pada saat harga perubahan entropi sistem sama dengan negatif harga perubahan entropi lingkungan atau sebaliknya. Hal ini dapat dinyatakan:

$$\Delta S_{as} = 0 \text{ atau } \Delta S + \Delta S_l = 0 \quad (2.111)$$

2.26. Hukum Ketiga Termodinamika

Berdasarkan hasil penelitian dari J.W. Richard, Walter Nerst dan Max Planck menyatakan, jika suatu zat murni diturunkan suhunya hingga 0 K, maka semua gerak translasi dan gerak rotasi molekul terhenti dan molekul-molekul mengambil kedudukan tertentu dalam kisi kristal. Dalam keadaan ini molekul hanya memiliki energi vibrasi yang sama besar, sehingga berada dalam keadaan kuantum tunggal. Jadi kedudukan dan distribusi energi dari molekul-molekul penyusun kristal murni pada suhu 0 K hanya dengan satu cara atau kebolehjadian susunan molekulnya ($W = 1$). Bahwa “Entropi semua zat padat kristal murni berharga nol pada temperatur absolut 0 K”. Harga entropi untuk larutan dan zat-zat cair yang didinginkan secara mendadak tidak berharga nol pada 0 K.

2.27. Fungsi Energi Bebas

Energi bebas ada dua jenis yaitu Energi bebas Helmholtz (F) dan Energi bebas Gibbs (G). F dan G merupakan fungsi keadaan dari pada sistem dan F dan G besarnya tergantung pada keadaan sistem dan tidak tergantung pada keadaan untuk mencapai sistem tersebut.

2.27.1. Energi Bebas Helmholtz

Fungsi energi bebas Helmholtz dikenal juga sebagai “ Fungsi Kerja Total”. Energi bebas Helmholtz didefinisikan sebagai:

$$F = U - TS \quad (2.112)$$

Jika sistem mengalami perubahan kecil, persamaan (2.112) dapat dituliskan:

$$\partial F = \partial U - T \partial S - S \partial T \quad (2.113)$$

Sebelumnya diperoleh:

$$\partial S = \frac{\partial q}{T} = \frac{\partial U + p \partial V}{T}$$

Setelah disubstitusikan ke dalam persamaan (2.113), selanjutnya diperoleh:

$$\partial F = \partial U - T \frac{\partial U + p \partial V}{T} - S \partial T$$

$$\partial F = \partial U - p \partial V - S \partial T$$

$$\partial F = -p \partial V - S \partial T \quad (2.114)$$

Jika sistem mengalami perubahan kecil pada temperatur tetap maka diperoleh:

$$\partial F = -p \partial V \quad (2.115)$$

Karena sebelumnya $\partial W = p \partial V$, maka

$$\partial F = -\partial W = -p \partial V$$

$$\int \partial F = - \int \partial W$$

$$F = -W_{\max} \text{ atau } -F = W_{\max} \quad (2.116)$$

$W_{\max}$ adalah kerja maksimum yang diperoleh pada proses dapat balik (*reversible*). Kalau suatu sistem yang *isothermal* melakukan kerja maksimum maka fungsi kerjanya akan berkurang sebesar F . Pada proses yang terjadi di alam, karena proses itu merupakan proses yang *irreversible* maka kerja yang diperoleh selalu lebih kecil dari pada pengurangan F (fungsi kerja).

Jika diberlakukan untuk gas ideal/ sempurna

$$\partial F = -p \partial V$$

$$\int \partial F = - \int_1^2 p \partial V$$

Diketahui dari persamaan gas sempurna $p = \frac{n.R.T}{V}$, selanjutnya:

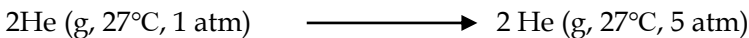
$$\int \partial F = - \int_1^2 \frac{n.R.T}{V} \partial V$$

$$\Delta F = -n.R.T \ln \frac{V_2}{V_1} \text{ atau} \quad (2.117)$$

$$\Delta F = -n.R.T \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (2.118)$$

Contoh soal 2.25

Hitung harga ΔF untuk proses yang dianggap dapat balik (*reversible*)



Jawab:

Karena proses berlangsung pada temperatur tetap dan dapat balik (*reversible*):

$$\Delta F = -n \cdot R \cdot T \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$\Delta F = -2 \text{ mol} \cdot 8,314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1} \cdot 300 \text{ K} \ln \frac{1}{5}$$

$$\Delta F = 8,029 \text{ kJ}$$

Latihan 2.25

Hitung harga ΔA untuk proses yang dianggap dapat balik (*reversible*)
 $3 \text{ O (g, 25}^\circ\text{C, 1 atm)} \longrightarrow 3 \text{ O (g, 25}^\circ\text{C, 10 atm)}$

2.27.2. Energi Bebas Gibbs

Energi bebas Gibbs yang juga dikenal sebagai Fungsi Gibbs dilambangkan dengan symbol G . energi bebas Gibbs lebih umum dikenal didalam kimia dibandingkan Energi bebas Helmholtz. Energi bebas Gibbs memegang peranan dalam kimia terutama untuk menentukan suatu proses kimia berlangsung spontan atau tidak. Jika reaksi kimia memiliki perubahan energi bebas Gibbs kurang dari nol ($\partial G < 0$), maka reaksi kimia akan berlangsung spontan. Jika reaksi kimia memiliki perubahan energi bebas Gibbs sama dengan nol ($\partial G = 0$), maka reaksi kimia akan mencapai kesetimbangan. Energi bebas Gibbs dapat didefinisikan sebagai

$$G = H - TS \quad (2.119)$$

Karena $H = U + pV$, selanjutnya:

$$G = U + pV - TS = U - TS + pV \quad (2.120)$$

sedangkan harga $U - TS = F$, jadi:

$$G = F + pV \quad (2.121)$$

Untuk perubahan pada tekanan konstan berlaku $\Delta G = \Delta F + p \Delta V$

Untuk perubahan pada temperatur dan tekanan konstan maka;

$-\Delta F = W_{\max}$, sedangkan

$$(\Delta G = \Delta F + p \Delta V) \times (-1)$$

$$-\Delta G = -\Delta F - p \Delta V$$

$$-\Delta G = W_{\max} - p \Delta V \quad (2.122)$$

Dalam persamaan ini dapat kita fahami bahwa pengurangan tenaga bebas Gibbs adalah sama dengan kerja maksimum dikurangi dengan kerja yang dilakukan oleh ekspansi dari sistem yang terjadi pada tekanan konstan. Sedangkan kerja dari ekspansi ini selalu sama dengan $p\Delta V = p(V_2 - V_1)$ dengan tidak memandang apakah proses tersebut dapat balik (*reversible*) atau irdapat balik (*reversible*), dengan menjaga agar tekanan udara luar konstan. Kerja bersih yang dihasilkan sama dengan $-\Delta G$ jika proses yang terjadi adalah dapat balik (*reversible*). Kerja bersih yang dihasilkan $< -\Delta G$, jika proses yang terjadi adalah *irreversible*. Kerja bersih yang dihasilkan akan sama dengan 0, jika pada proses tersebut tidak dihasilkan kerja.

2.27.2.1. Hubungan Energi Bebas Gibbs dan Tekanan

Energi bebas Gibbs merupakan fungsi temperatur dan tekanan. Pengaruh tekanan dan temperatur dapat dijelaskan sebagai berikut:

Berdasarkan persamaan (2.119) dan (2.120) dituliskan:

$$G = H - TS$$

$$G = U + pV - TSV$$

Jika sistem mengalami perubahan kecil, maka persamaan (2.120) akan berubah menjadi:

$$\partial G = \partial U + p \partial V + V \partial p - T \partial S - S \partial T \quad (2.123)$$

Sebelumnya diketahui $\partial U = T \partial S - p \partial V$, setelah disubstitusikan ke persamaan (2.123) maka akan diperoleh:

$$\partial G = T \partial S - p \partial V + p \partial V + V \partial p - T \partial S - S \partial T \quad (2.124)$$

$$\partial G = V \partial p - S \partial T \quad (2.125)$$

Jika sistem mengalami perubahan kecil pada tekanan tetap ($\partial p = 0$), maka akan diperoleh hubungan:

$$\partial G = -S \partial T \quad \text{atau} \quad (2.126)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_p = -S \quad (2.127)$$

Jika sistem mengalami perubahan kecil pada temperatur tetap ($\partial T = 0$), maka akan terjadi hubungan:

$$\partial G = V \partial p \quad \text{atau} \quad (2.128)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial p}\right)_T = V \quad (2.129)$$

Jika sistem merupakan gas sempurna mengalami perubahan kecil pada temperatur tetap ($\partial T = 0$), maka persamaan (2.129) akan menjadi:

$$\int \partial G = \int_i^f V \partial p$$

$$\Delta G = V \Delta P = V(P_f - P_i) \quad \text{atau} \quad (2.130)$$

Jika persamaan gas sempurna $V = \frac{nRT}{p}$, maka:

$$\int \partial G = \int_i^f V \partial p$$

$$\int \partial G = \int_i^f \frac{nRT}{p} \partial p$$

$$\Delta G = nRT \ln \frac{p_f}{p_i} \quad (2.131)$$

Contoh soal 2.26

Hitung harga ΔG untuk proses yang dianggap dapat balik (*reversible*)
 $2\text{He (g, } 27^\circ\text{C, } 1 \text{ atm)} \longrightarrow 2 \text{ He (g, } 27^\circ\text{C, } 5 \text{ atm)}$

Jawab:

Karena proses berlangsung pada temperatur tetap dan dapat balik (*reversible*) maka $\Delta H = 0$,

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

Dari persamaan (2.131) dinyatakan:

$$\Delta S = n R \ln \frac{V_f}{V_i} = -n R \ln \frac{P_f}{P_i} = n R \ln \frac{P_i}{P_f}$$

$$\Delta G = -T \Delta S = -T (n \cdot R \ln \frac{P_1}{P_2})$$

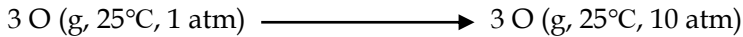
$$\Delta G = -n \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$\Delta G = -2 \text{ mol} \cdot 8,314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1} \cdot 300 \text{ K} \ln \frac{1}{5}$$

$$\Delta G = +8,029 \text{ kJ}$$

Latihan 2.26

Hitung harga ΔG untuk proses yang dianggap dapat balik (*reversible*)



2.27.2.2. Kebergantungan Fungsi Gibbs pada Temperatur

Pada persamaan (2.119) dinyatakan:

$$G = H - TS$$

$$TS = H - G$$

$$S = \frac{H - G}{T}$$

Dengan merujuk persamaan (2.127)

$$\begin{aligned} - \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P &= \frac{H - G}{T} \\ \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P &= \frac{G - H}{T} \\ \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P &= \frac{G}{T} - \frac{H}{T} \\ \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P - \frac{G}{T} &= -\frac{H}{T} \end{aligned} \quad (2.132)$$

Misal : $y = U \cdot V$ maka $y^I = U^I \cdot V + V^I \cdot U$

$$y = x \cdot \frac{1}{z}$$

$$\partial y = \partial x \times \frac{1}{z}$$

$$\left(\frac{\partial y}{\partial T} \right) = \frac{1}{z} \left(\frac{\partial x}{\partial T} \right) + x \left(\frac{\partial \frac{1}{z}}{\partial T} \right)$$

Jadi :

$$\partial \frac{G}{T} = \partial G \times \frac{1}{T}$$

$$\left(\frac{\partial \frac{G}{T}}{\partial T} \right)_P = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P + G \left(\frac{\partial \frac{1}{T}}{\partial T} \right)_P$$

$$\left(\frac{\partial \frac{G}{T}}{\partial T} \right)_P = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P - \frac{G}{T^2}$$

Jika kedua ruas dikalikan dengan T , maka :

$$T \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P = \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P - \frac{G}{T}$$

$$\text{Dari persamaan (2.132): } \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P - \frac{G}{T} = -\frac{H}{T}$$

Maka :

$$T \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P = -\frac{H}{T}$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P = -\frac{H}{T^2}$$

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T} \right)_P = -\frac{\Delta H}{T^2} \quad (2.133)$$

$$\int \partial \frac{\Delta G}{T} = - \int \frac{\Delta H}{T^2} \partial T \quad (2.134)$$

Penggunaan yang sangat penting persamaan (2.134) dipergunakan dalam reaksi-reaksi kimia yang akan dipelajari lebih lanjut.

Contoh soal 2.27 :

Diketahui reaksi: $\frac{1}{2} \text{N}_2 + \frac{3}{2} \text{H}_2 \rightarrow \text{NH}_3$, $\Delta G_{298} = -16,49 \text{ kJ}$

Jika ΔH° pada temperatur $T = -37490 - 28,5 T - 0,00295 T^2$ Joule.

Hitunglah harga ΔG pada temperatur $T = 400 \text{ K}$

Jawab :

$$\int \frac{\partial \Delta G}{T} = - \int \frac{\Delta H}{T^2} \partial T$$

$$\frac{\Delta G}{T} = \int \frac{37490}{T^2} \partial T + \int \frac{28,5}{T} \partial T + \int 0,00295 \partial T$$

$$\frac{\Delta G}{T} = -37490 \left(\frac{1}{T} \right) + 28,5 \ln T + 0,00295 T + C$$

$$\Delta G = -37490 + 28,5 T \ln T + 0,00295 T^2 + C T$$

Pada 298 K :

$$-16,49 \text{ kJ} = -37490 \text{ J}$$

$$+ 28,5 (298) \ln(298) + 0,00295 (298)^2 + 298 C$$

$$-16,49 \text{ kJ} = -37490 \text{ J} + 48385,41 \text{ J} + 261,97 \text{ J} + 298 C$$

$$\begin{aligned}
-16,49 \text{ kJ} &= 11157,38 \text{ J} + 298 \text{ C} \\
-16,49 \text{ kJ} - 11,15738 \text{ kJ} &= 298 \text{ C} \\
-27,65 \text{ kJ} &= 298 \text{ C} \\
-10,77 \text{ kJ} &= \text{C}
\end{aligned}$$

ΔG pada temperatur 400 K

$$\Delta G = -37490 + 28,5 (400) \ln 400 + 0,00295 (400)^2 + (-10,77)$$

$$\Delta G = -37490 + 68302,7 + 472 - 10,77$$

$$\Delta G = 31273,93 \text{ J}$$

2.27.2.3. Kebergantungan Fungsi Gibbs pada Entalpi

Sebelumnya telah dinyatakan pada persamaan (2.119) tertulis:

$$G = H - TS$$

Perubahan energi bebas pada temperatur tetap dapat dituliskan:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.135)$$

Jika persamaan (2.135) didiferensialkan terhadap T pada tekanan tetap, maka diperoleh:

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial \Delta H}{\partial T}\right)_p - T \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial T}\right)_p - \Delta S \left(\frac{\partial T}{\partial T}\right)_p \quad (2.136)$$

Seperti dituliskan pada persamaan (2.18), bahwa $\left(\frac{\partial \Delta H}{\partial T}\right)_p = \Delta C_p$ dan

persamaan (2.96) bahwa $\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial T}\right)_p = \frac{\Delta C_p}{T}$, setelah disubstitusikan

kedalam persamaan (2.136) diperoleh:

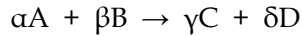
$$\begin{aligned}
\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right)_p &= \Delta C_p - T \frac{\Delta C_p}{T} - \Delta S \\
\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right)_p &= -\Delta S \quad (2.137)
\end{aligned}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.137) ke dalam persamaan (2.135) akan diperoleh hubungan:

$$\begin{aligned}
\Delta G &= \Delta H - T\Delta S \\
\Delta G &= \Delta H + T \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right)_p \quad (2.138)
\end{aligned}$$

2.27.2.4. Perubahan Energi Bebas Gibbs Berdasarkan Energi Bebas Pembentukan Standar

Jika diketahui suatu reaksi sebagai berikut:



dengan data energi bebas dari pembentukan standart masing-masing G_{fA}^0 ; G_{fB}^0 ; G_{fC}^0 ; dan G_{fD}^0 . Maka perubahan energi bebas Gibbs yang menyertai reaksi tersebut dapat dihitung sebagai berikut:

$$\Delta G = \sum G_{f \text{ Hasil Reaksi}}^0 - \sum G_{f \text{ pereaksi}}^0 \quad (2.139)$$

$$\Delta G = \gamma \cdot G_{fC}^0 + \delta \cdot G_{fD}^0 - \alpha \cdot G_{fA}^0 - \beta \cdot G_{fB}^0 \quad (2.140)$$

Contoh soal 2.28

Diketahui data G_f^0 dari CO_2 ; CO dan O_2 berturut-turut -394,4; -137,2 dan 0 kJ mol⁻¹. Hitung fungsi Gibbs reaksi standart $\text{CO}_{(g)} + \frac{1}{2} \text{O}_{2(g)} \rightarrow \text{CO}_{2(g)}$.

Jawab:

$$\Delta G = \sum G_{f \text{ Hasil Reaksi}}^0 - \sum G_{f \text{ pereaksi}}^0$$

$$\Delta G = G_{f \text{ CO}_{2(g)}}^0 - G_{f \text{ CO}_{(g)}}^0 - \frac{1}{2} G_{f \text{ O}_{2(g)}}^0$$

$$\Delta G = -394,4 - (-137,2) - \frac{1}{2} \cdot 0$$

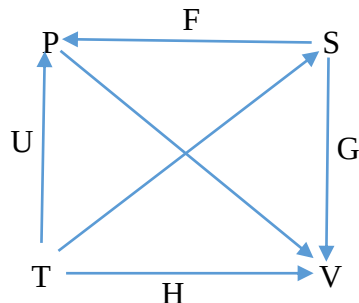
$$\Delta G = -257,2 \text{ kJ mol}^{-1}$$

Latihan 2.28

Diketahui data G_f^0 dari CH_4 ; CO_2 ; H_2O dan O_2 berturut-turut; -50,7; -394,4; -237,1 dan 0 kJ mol⁻¹

Hitung perubahan energi bebas Gibbs standar pada reaksi pembakaran CH_4

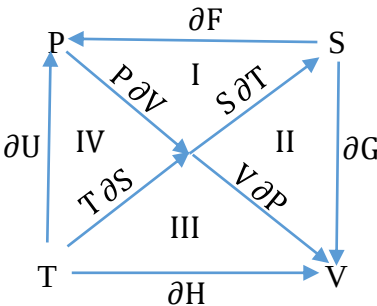
2.28. Ringkasan Persamaan Termodinamika



Gambar 2.7 Vektor Rumus Dasar Termodinamika

Berdasarkan Gambar 2.7 diperoleh beberapa segitiga vektor. Dari masing-masing segitiga vektor dapat dirumuskan satu rumus dasar di dalam Termodinamika. Cara penentuan rumus dasar Termodinamika adalah menuliskan lambang vektor untuk vektor yang berlambang, menuliskan awal vektor dan akhir vektor sesuai arah vektor untuk vektor yang tidak berlambang. Segitiga-segitiga vektor tersebut adalah:

1. Segitiga vektor TPV: $H = U + PV$
2. Segitiga vektor TSV: $H = TS + G$ atau $G = H - TS$
3. Segitiga vektor TSP: $U = TS + F$ atau $F = U - TS$
4. Segitiga vektor SPV: $G = F + PV$



Gambar 2.8 Vektor Rumus Dasar Termodinamika pada proses perubahan kecil

Berdasarkan Gambar 2.8 dapat terlihat empat segitiga vektor yang ditunjukkan melalui bilangan romawi. Segitiga-segitiga vektor tersebut adalah:

1. Segitiga vektor I: $\partial F = -S \partial T - P \partial V$
2. Segitiga vektor II: $V \partial P = S \partial T + \partial G$ atau $\partial G = V \partial P - S \partial T$
3. Segitiga vektor III: $\partial H = T \partial S + V \partial P$
4. Segitiga vektor IV: $T \partial S = \partial U + P \partial V$ atau $\partial U = TS - P \partial V$

2.29. Hubungan Maxwell

Hubungan atau relasi Maxwell dapat diambil dari rumus-rumus dasar Termodinamika untuk proses kimia yang mengalami perubahan kecil. Dalam kenyataannya hubungan Maxwell meliputi empat variabel S , p , V dan T . Secara umum relasi/hubungan Maxwell dapat dirumuskan sebagai berikut:

Persamaan dasar termodinamika:

$$A = WZ \mp XY$$

Rumus Hubungan Maxwell:

$$\left(\frac{\partial W}{\partial Y}\right)_Z = \mp \left(\frac{\partial X}{\partial Z}\right)_Y$$

Dimana W , X , Y dan Z masing-masing adalah S , p , V dan T . Syaratnya kedua aturan berikut diikuti:

- 1) Hasil kali silang WZ dan XY harus dalam bentuk kerja, yaitu $p.V$ dan $S.T$
- 2) Tanda negative dipilih jika W dan Y atau X dan Z adalah T dan V

Ada 4 hubungan Maxwell yang dapat dirumuskan:

1. Dari persamaan $\partial F = -S \partial T - P \partial V$ dapat diperoleh hubungan Maxwell

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V \text{ atau } \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S \quad (2.141)$$

2. Dari persamaan $\partial G = V \partial P - S \partial T$ dapat diperoleh hubungan Maxwell

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = -\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T \text{ atau } \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V \quad (2.142)$$

3. Dari persamaan $\partial H = T \partial S + V \partial P$ dapat diperoleh hubungan Maxwell

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T \text{ atau } \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P \quad (2.143)$$

4. Dari persamaan $\partial U = TS - P \partial V$ dapat diperoleh hubungan Maxwell

$$-\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T \text{ atau } -\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P \quad (2.144)$$

Contoh soal 2.29

Buktikan bahwa: $\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$

Jawab :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

$$\partial H = T \partial S + V \partial P$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T + V \left(\frac{\partial P}{\partial P}\right)_T$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T + V$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = V + T \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T$$

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

Latihan 2.29

Buktikan bahwa: $\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_V = C_V + V \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V$

2.30. Aturan Siklis

Aturan siklis terjadi jika setiap tiga variabel (x, y, z) dihubungkan oleh hubungan fungsional, maka ketiga turunan dinyatakan oleh:

$$\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y = -1$$

Atau

$$\left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)_y \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_z \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_x = -1$$

Sebagai contoh dalam ungkapan $\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p$ terdapat tiga variabel yaitu H, T dan P, selanjutnya dapat dinyatakan dalam bentuk aturan siklis sebagai berikut:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H \left(\frac{\partial P}{\partial H}\right)_T = -1$$

Atau

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_H \left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)_P = -1$$

Contoh soal 2.30:

Koefisien Joule Thomson diberikan oleh hubungan

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_H = -\frac{1}{C_p} \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T$$

Jawab:

Dari persamaan Joule Thomson, terdapat tiga variabel yaitu H, p dan T, sehingga dengan mengikuti aturan siklis dapat dituliskan:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_H \left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)_p = -1$$

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H \text{ dan } \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p = C_p$$

$$\frac{1}{C_p} \frac{1}{\mu_{JT}} \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T = -1$$

$$-\frac{1}{C_p} \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T = \mu_{JT}$$

Latihan 2.30:

Jika $\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$ dan $\beta = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T$, Turunkan hubungan berikut:

$$C_p - C_V = \frac{TV\alpha^2}{\beta}$$

Jawab:

Pembuktian:

Sebelumnya telah dibuktikan $C_p - C_v = nR$, salah satu tahapnya didapatkan persamaan:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P + P \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = nR$$

$$\left[\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T + P\right] \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = C_p - C_v$$

Salah satu persamaan dasar termodinamika didapatkan persamaan:

$$\partial U = T \partial S - P \partial V$$

Jika persamaan ini diturunkan terhadap V pada T tetap, maka diperoleh persamaan:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T - P \left(\frac{\partial V}{\partial V}\right)_T$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T - P$$

Sehingga persamaan $\left[\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T + P\right] \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = C_p - C_v$ berubah menjadi:

$$\left[T \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T - P + P\right] \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = C_p - C_v$$

$$\left[T \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T\right] \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = C_p - C_v$$

Dari persamaan dasar termodinamika $\partial H = T \partial S + V \partial P$ didapatkan hubungan Maxwell $\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V$ sehingga:

$$\left[T \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T\right] \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V\right] \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = C_p - C_v$$

Dari $\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V$ terdapat variabel P, T dan V, jika dibuat persamaan menurut aturan siklis didapatkan hubungan:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T = -1$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = -\frac{1}{\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T} = -\frac{\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P}{\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T} = -\frac{\alpha V}{-\beta V} = \frac{\alpha V}{\beta V}$$

Sehingga:

$$\left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \right]_T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = C_p - C_v$$

$$\left[T \frac{\alpha V}{\beta} \right]_T = C_p - C_v$$

$$\left[T \frac{\alpha}{\beta} \right]_T \alpha V = C_p - C_v$$

$$\frac{TV\alpha^2}{\beta} = C_p - C_v$$

PUSTAKA

- ATKINS, P. W. (1990). Physical Chemistry. Oxford New York Toronto, OXFORD UNIVERSITY PRESS.
- BOAS, M. L. (1983). Mathematical Methods In The Physical Sciences. New York, John Wiley & Son.
- DOGRA, S. K. and S. DOGRA (1990). Kimia Fisik dan Soal-soal. Salemba 4, Jakarta 10430, Universitas Indonesia (UI-Press).
- Smith, E. B. (1982). Basic Chemical Thermodynamics. New York, Oxford University Press.
- Sukardjo, D. (1989). KIMIA FISIKA. Jakarta, PT. BINA AKSARA

SOAL-SOAL

1. Satu mol gas diatomis dipanaskan. Sistem menyerap 100 J panas namun melakukan kerja ekuivalen dengan 50 J terhadap sekeliling. Hitung perubahan energi dalam sistem.
2. Satu mol gas menyerap 400 J panas pada volume tetap dan temperaturnya naik dari 20 °C menjadi 25 °C. Hitung harga W, q dan ΔU
3. Jika ΔH untuk reaksi pada 298 K, $CO_{(g)} + \frac{1}{2}O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$ adalah 282,85 kJ mol⁻¹. Hitung perubahan energi dalamnya (ΔU).
4. Hitung perbedaan antara kapasitas panas dan tekanan tetap dan volume tetap dari tembaga pada 20 °C. Diketahui α = 0,492 × 10⁴ K⁻¹, β = 0,70 × 10⁻⁶ atm⁻¹ dan kerapatan tembaga = 8,96 kg L⁻¹.

5. 5 g larutan asam asetat dibakar dengan gas oksigen berlebih pada suatu kalorimeter bom menghasilkan gas karbon dioksida dan air. Jika kapasitas panas kalorimeter adalah 1500 J K^{-1} , hitung kenaikan temperatur sistem; $\Delta H_{\text{pembakaran}} = -872,36 \text{ kJ mol}^{-1}$
6. Hitung panas pembakaran reaksi berikut, jika diketahui $\Delta H_f^0(\text{C}_2\text{H}_2) = -226,73 \text{ kJ mol}^{-1}$; $\Delta H_f^0(\text{CO}_2) = -393,52 \text{ kJ mol}^{-1}$ dan $\Delta H_f^0(\text{H}_2\text{O}) = -285,84 \text{ kJ mol}^{-1}$

$$\text{C}_2\text{H}_2(\text{g}) + \frac{5}{2}\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$$
7. Perubahan entalpi reaksi dibawah ini adalah $-2220,07 \text{ kJ mol}^{-1}$

$$\text{n-C}_3\text{H}_8(\text{g}) + 5\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 3\text{CO}_2(\text{g}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l})$$
 Jika diketahui energi ikatan (D): $D_{\text{O}=\text{O}} = 494,97 \text{ kJ mol}^{-1}$; $D_{\text{C}-\text{H}} = 412,12 \text{ kJ mol}^{-1}$; $D_{\text{C}-\text{O}} = 723,83 \text{ kJ mol}^{-1}$; $D_{\text{O}-\text{H}} = 464,42 \text{ kJ mol}^{-1}$
8. Hitung berapa besarnya $\Delta H_{348\text{K}}^0$ dari reaksi:

$$\frac{1}{2}\text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow \text{HCl}(\text{g}) \quad \Delta H_{298\text{K}}^0 = -91,9 \text{ kJ mol}^{-1}$$
 Jika diketahui data:
 $C_p \text{H}_2(\text{g}) = 28,4 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$
 $C_p \text{Cl}_2(\text{g}) = 32,1 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$
 $C_p \text{HCl}_2(\text{g}) = 28,3 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$
9. Perubahan entalpi reaksi ΔH^0 reaksi dibawah ini $-393,51 \text{ kJ mol}^{-1}$.

$$\text{C}_{(\text{grafit})} + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$$
 Dan diketahui C_p adalah

$$C_p(\text{C}) = -5,293 + 58,61 \times 10^{-3} \text{ T} - 432,25 \times 10^{-7} \text{ T}^2$$

$$C_p(\text{O}_2) = 25,723 + 12,98 \times 10^{-3} \text{ T} - 38,62 \times 10^{-7} \text{ T}^2$$

$$C_p(\text{CO}_2) = 26,00 + 43,50 \times 10^{-3} \text{ T} - 148,32 \times 10^{-7} \text{ T}^2$$
 Hitung ΔH pada 1000 K
9. Hitung kenaikan entropi jika satu mol krypton dipanaskan dari 27°C sampai 227°C pada volume konstan dan tekanan konstan ($C_v = 3/2 \text{ R}$)
10. n-Hexan mendidih pada temperatur $68,74^\circ\text{C}$ dan panas penguapan molar $16419,05 \text{ J mol}^{-1}$. Proses penguapan isothermal dan dapat balik (*reversible*). Hitung berapa besar perubahan entropi.

11. Hitung perubahan entropi bila 10 g es pada 0°C ditambahkan kedalam 50 g air pada 40°C dalam sistem yang terisolasi. Panas pencairan es = 332,08 J mol⁻¹, kalor jenis air = 4,2 JK⁻¹mol⁻¹.
12. Hitung entropi campuran dari unsur-unsur komposisi udara yang terdiri dari 79% N₂, 20% O₂ dan 1% Ar.
13. Berapakah besarnya ΔG , ΔH dan ΔS pada 1000 K untuk reaksi

$$\frac{1}{2} \text{N}_2(\text{g}) + \frac{3}{2} \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{NH}_3(\text{g}), \quad \Delta G_{298} = -16,6 \text{ kJ}$$
 jika diketahui $\Delta H = -9190 - 7,2T + 3,2 \times 10^{-3}T^2 - 2,6 \times 10^{-7}T^3$
14. Diketahui data ΔG_f^0 dari C₆H_{6(l)}; CO₂; H₂O dan O₂ berturut-turut adalah +124,3; -394,4; -237,1 dan 0 kJ mol⁻¹. Hitung perubahan energi bebas Gibbs pada pembakaran C₆H_{6(l)}
15. Buktikan bahwa
 - a. $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = 0$ untuk gas sempurna
 - b. $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = \frac{a}{V^2}$ untuk gas van der Waals
 - c. $\left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_T = T - V \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P$
 - d. $T \partial S = C_v \partial T + T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V \partial V$
16. Buktikan bahwa:

$$\mu_{JT} = \frac{T^2}{C_p} \left(\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right) \right)_p$$

GAS & TERMODINAMIKA

Tentang Penulis

Prof. Dr. Mukhamad Nurhadi, M.Si adalah penulis yang lahir di Pulokulon, Grobogan, Jawa Tengah 15 April 1969. Penulis adalah staf dosen di Program Studi Pendidikan Kimia Jurusan PMIPA FKIP Universitas Mulawarman. Penulis mengampu matakuliah Kimia Fisika 1 dan 2, Kimia Zat Padat, Kimia Katalis, Kimia Kuantum dan Kimia Dasar. Penulis menyelesaikan program Sarjana di Jurusan Pendidikan Kimia IKIP Semarang pada tahun 1992, menyelesaikan program Master Kimia di Universitas Gadjah Mada pada tahun 2000 dan menyelesaikan program Doktor Kimia di Universiti Teknologi Malaysia pada tahun 2015. Sejak tahun 2015 sampai saat ini telah menghasilkan 18 artikel yang terindeks Scopus di jurnal internasional. Beberapa artikel lain juga telah berhasil ditulis dan dipublikasikan di jurnal nasional. Setelah menyelesaikan program Doktor, penulis terus aktif melakukan penelitian dibidang katalis heterogen, adsorpsi dan penelitian dalam bidang Pendidikan Kimia. Gelar guru besar dalam bidang kimia fisika diperoleh penulis pada tahun 2019.



Media Nusa Creative
Anggota IKAPI (162/JTI/2015)
Bukit Cemara Tidar H5 No. 34 Malang
Telp : 0812 3334 0088
Email : mncpublishing.layout@gmail.com
Website : www.mncpublishing.com



ISBN 978-602-462-641-9



9 786024 626419