

Buku Ajar

**OPERASI PERPINDAHAN
MASSA DAN PANAS**



UAD PRESS

**Gita Indah Budiarti, S.T., M.T.
Shinta Amelia, S.T., M.Eng.**

PRAKATA

Metode pembelajaran saat ini dituntut untuk mahasiswa menjadi *center learning* atau pusat belajar. Untuk melatih mahasiswa menjadi sumber pembelajaran diperlukan media pembelajaran yang efektif memicu keaktifan mahasiswa dalam perkuliahan. Buku ajar merupakan salah satu media pembelajaran yang standar dalam perkuliahan. Buku ajar juga ini dapat membantu dosen menyampaikan materi pembelajaran lebih detail.

Mata kuliah Operasi Massa dan Panas (OPMP) merupakan mata kuliah inti teknik kimia yang berisi mengenai fenomena yang terjadi pada saat terjadi perpindahan (transfer). Hal ini sangat penting bagi seorang sarjana teknik kimia. Materi OPMP yang begitu kompleks disertai dengan persoalan studi kasus yang beragam membuat waktu yang disediakan di kelas tidak mencukupi apabila disampaikan di kelas. Buku ajar ini terdiri dari materi berupa teori, penurunan rumus, ringkasan rumus-rumus penting, contoh soal serta soal latihan atau studi kasus. Materi yang akan diulas pada buku ini antara lain dasar perpindahan berupa pengertian perpindahan massa, momentum, dan panas, hal yang menyebabkan fenomena tersebut terjadi, difusivitas, perancangan alat-alat teknik kimia yang menggunakan prinsip perpindahan massa dan panas.

Buku ajar ini diharapkan dapat membantu mahasiswa untuk belajar secara mandiri sehingga semua materi dapat diterima dengan baik. Mahasiswa memiliki pengalaman belajar yang baru, tidak hanya mendengarkan dosen namun mereka dituntut untuk memahami materi secara mandiri, dan mampu menemukan permasalahan. Permasalahan tersebut dapat disampaikan pada saat tatap muka di kelas. Hal ini dapat meningkatkan keaktifan mahasiswa di kelas.

Yogyakarta, 31 Oktober 2020

Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	ii
DAFTAR ISI.....	iii
BAB I KONSEP PERPINDAHAN MASSA DIFFUSIONAL.....	1
I. TUJUAN PEMBELAJARAN.....	1
II. MATERI.....	1
III. RINGKASAN MATERI.....	28
IV. LATIHAN SOAL.....	29
BAB II DIFUSI MOLEKULER DALAM KEADAAN TETAP.....	30
I. TUJUAN PEMBELAJARAN.....	30
II. MATERI PEMBELAJARAN.....	30
III. RINGKASAN MATERI.....	44
IV. LATIHAN SOAL.....	44
BAB III DIFUSI MELALUI NON STAGNANT FILM.....	45
I. TUJUAN PEMBELAJARAN.....	45
II. MATERI PEMBELAJARAN.....	45
III. RINGKASAN MATERI.....	58
IV. LATIHAN SOAL.....	59
BAB IV TRANSFER MASSA ANTAR FASE.....	60
I. TUJUAN PEMBELAJARAN.....	60

II. MATERI PEMBELAJARAN.....	60
III. RANGKUMAN MATERI.....	75
BAB V HUMIDIFIKASI DAN DEHUMIDIFIKASI.....	78
I. TUJUAN PEMBELAJARAN.....	78
II. MATERI.....	78
III. RANGKUMAN.....	98
IV. LATIHAN SOAL.....	100
BAB VI DRYING (PENGERINGAN).....	101
I. TUJUAN PEMBELAJARAN.....	101
II. MATERI.....	101
III. RANGKUMAN.....	116
IV. LATIHAN SOAL.....	117
BAB VII EVAPORASI (PENGUAPAN).....	118
I. TUJUAN PEMBELAJARAN.....	118
II. MATERI.....	118
BAB VIII KRISTALISASI.....	131
I. TUJUAN PEMBELAJARAN.....	131
II. MATERI.....	131
III. RANGKUMAN.....	142
IV. LATIHAN SOAL.....	143

DAFTAR TABEL

Tabel 1 . Koefisien Difusivitas Cairan.....	8
Tabel 2 . Koefisien Difusivitas Padatan.....	10
Tabel 3 . Koefisien Difusivitas Pasangan Gas.....	12
Tabel 4 . Konstanta Gaya Lennard-Jones dari Data Viskositas.....	14
Tabel 5 . Integral Tumbukan berdasarkan Potensial Lennard-Jones.....	15
Tabel 6 . Volume Difusi atom untuk Metode Fuller.....	18
Tabel 7 . Volume Atom untuk Molekul Kompleks Molekul untuk Senyawa Sederhana.....	21
Tabel 8 . Nilai Φ_B Untuk Beberapa Solven.....	21

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 . Ilustrasi Peristiwa Transfer Massa.....	2
Gambar 2 . Ilustrasi Percobaan Penentuan Difusivitas Cairan.....	23
Gambar 3 . Ilustrasi Peristiwa Difusi dalam Pipa Kapiler.....	24
Gambar 4 . Jenis-Jenis Pori.....	27
Gambar 5 . Ilustrasi Difusi Berlawanan Arah.....	35
Gambar 6 . Ilustrasi Peristiwa Penguapan.....	37
Gambar 7 . Mekanisme Difusi Solut ke Padatan.....	42
Gambar 8 . Ilustrasi Difusi melalui 2 Film.....	43
Gambar 9 . Ilustrasi Trasnsfer Massa Dua Film.....	47
Gambar 10 . Ilustrasi Perpindahan Massa (a) Fasa Gas (b) Fasa Cair.....	47
Gambar 11 . Gambar Menara Sembur.....	66
Gambar 12 . Bagian dari Menara Sembur.....	66
Gambar 13 . Menara Bahan Isian.....	68
Gambar 14 . Menara Gelembung.....	69
Gambar 15 . <i>Plate Tower</i>	70
Gambar 16 . Sieve Tray.....	71
Gambar 17 . Kurva kesetimbangan.....	73
Gambar 18 . Konsep Transfer Massa Humidifikasi dan Dehumidifikasi.....	79
Gambar 19 . Sistem Adiabatik Udara-Uap Air.....	87

Gambar 20 . Pengukuran Suhu Wet Bulb.....	89
Gambar 21 . Prinsip Kerja Cooling Tower.....	92
Gambar 22 . Profil Temperatur dan Concentrasi Cooling Tower.....	93
Gambar 23 . Pola Aliran Perpindahan Massa pada Cooling Tower.....	94
Gambar 24 . Kurva Laju Pengeringan untuk Kondisi Pengeringan Konstan....	105
Gambar 25 . Falling Film Evaporator.....	120
Gambar 26 . Rising Film (Long Tube Vertical) Evaporator.....	121
Gambar 27 . Plate Evaporator.....	121
Gambar 28 . Multi-effect Evaporator.....	122
Gambar 29 . Single-effect Evaporator.....	125
Gambar 30 . Evaporator.....	132
Gambar 31 . Skema Membran Separasi.....	132
Gambar 32 . Skema Pemekatan dengan Pembekuan.....	133
Gambar 33 . Skema Tahapan Kristalisasi.....	134
Gambar 34 . Kurva Kristalisasi.....	135
Gambar 35 . Pertumbuhan Kristal.....	135
Gambar 36 . Grafik Kelarutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ dalam Air.....	136

BAB I

KONSEP PERPINDAHAN MASSA DIFFUSIONAL

I. TUJUAN PEMBELAJARAN

Mahasiswa dapat menjelaskan dan menerapkan tentang konsep dasar perpindahan massa difusional meliputi :

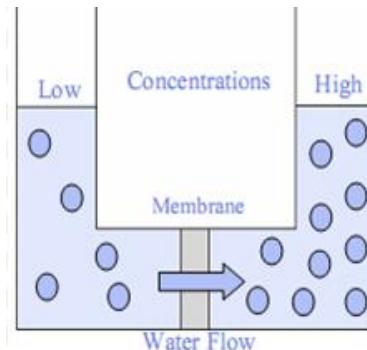
1. Dasar-dasar Transfer Massa
2. Konsentrasi
3. Fluks dan hukum Fick's
4. Koefisien difusi
5. Koefisien difusi gas
6. Koefisien difusi cairan
7. Persamaan transfer massa

II. MATERI

1. Pengertian Transfer Massa

Transfer massa merupakan salah satu *Chemical Engineering Tools*, yaitu konsep-konsep atau prinsip-prinsip seorang Teknik Kimia dalam menyelesaikan tugasnya. Transfer massa adalah gerakan molekul-molekul dari elemen fluida yang disebabkan adanya suatu gaya pendorong.

Contoh peristiwa transfer massa adalah difusi molekuler, difusi olakan dan transfer massa konveksi.



Gambar 1. Ilustrasi Peristiwa Transfer Massa

Proses-proses transfer di bidang teknik kimia meliputi :

a. Secara Fisis

- Transfer momentum

Dijumpai di kasus aliran fluida, pencampuran, sedimentasi dan filtrasi.

- Transfer panas

Dijumpai pada alat-alat pertukaran panas, distilasi, dan pengeringan.

- Transfer massa

Dijumpai pada alat-alat distilasi, pengeringan, ekstraksi, absorpsi, adsorpsi, stripping dan membran.

b. Secara Kimia

Proses transfer terjadi pada reaksi kimia.

Transfer massa perlu dipelajari terutama oleh seorang sarjana Teknik Kimia karena banyak fenomena transfer massa di dunia industri kimia. Aplikasi transfer massa banyak digunakan pada alat pemisah dan pemurnian. Di Industri, pemisahan komponen-komponen dari campurannya menggunakan alat transfer massa seperti absorpsi, distilasi terjadi karena adanya transfer massa. Peristiwa perpindahan massa atau transfer massa atau difusi banyak dijumpai di dalam kehidupan sehari-hari. Contoh peristiwa transfer massa adalah :

- larutnya kristal gula dalam air, artinya komponen gula mendifusi ke fase air.
- larutnya kopi ke dalam air,
- terjerapnya zat beracun ke dalam arang,
- larutnya oksigen ke dalam darah,
- pada proses fermentasi, nutrisi dan oksigen yang terlarut dalam larutan mendifusi ke mikroorganisme,
- pengambilan uranium dari batuan, dengan cara ekstraksi menggunakan pelarut organik, misal heksana.
- penghilangan logam berbahaya dari limbah cair menggunakan adsorben, dll.

Kondisi optimum suatu proses dapat ditentukan jika mekanisme dalam peristiwa transfer massa diketahui. Di industri kimia sangat penting mengetahui kecepatan transfer massa. Hal ini untuk menghitung waktu pemisahan. Perhitungan kecepatan transfer massa atau perpindahan menggunakan persamaan umum kecepatan perpindahan/ transfer :

$$\text{kecepatan perpindahan} = \frac{\text{gaya pendorong}}{\text{tahanan}}$$

Pada proses transfer perlu adanya gaya pendorong agar perpindahan atau transfer dapat berlangsung. Pada transfer massa, gaya pendorongnya adalah perbedaan konsentrasi.

Pada transfer panas, gaya pendorongnya adalah perbedaan suhu. Pada transfer momentum gaya dorongnya adalah perbedaan momen gaya (mv).

2. Konsentrasi

Konsentrasi suatu zat adalah jumlah zat terlarut dibagi jumlah volume larutan total. Satuan dari konsentrasi adalah mol/volume. Konsentrasi dapat dibagi menjadi 2 macam yaitu konsentrasi massa dan konsentrasi molar.

a. Konsentrasi Massa

Konsentrasi massa suatu zat adalah massa zat terlarut dibagi volume zat campuran. Rumus yang digunakan sebagai berikut :

$$C_A = \frac{m_A}{V_T}$$

Dimana C_A adalah konsentrasi massa zat A, m_A adalah zat terlarut, V_T adalah volume total campuran. Selain menggunakan rumus di atas, konsentrasi massa dapat dihitung menggunakan fraksi massa. Fraksi massa merupakan perbandingan massa suatu zat dibagi dengan massa total campuran dapat dinotasikan sebagai berikut :

$$\omega_A = \frac{m_A}{m_T}$$

Dengan ω_A adalah fraksi massa zat A, m_A adalah massa A, m_T adalah massa total. Konsentrasi massa merupakan hasil perkalian dari fraksi massa dengan konsentrasi total campuran. Pernyataan tersebut dapat dinotasikan sebagai berikut :

$$C_A = \omega_A \cdot C_T$$

Dengan C_A adalah konsentrasi massa zat A, ω_A adalah fraksi massa zat A, C_T adalah konsentrasi total campuran. Konsentrasi total adalah massa total campuran dibagi dengan volume total campuran. Pernyataan tersebut dapat dinotasikan sebagai berikut :

$$C_T = \frac{m_A + m_B + m_C}{V_T}$$

Dimana

C_T : konsentrasi total

M_A : massa zat A

M_B : massa zat B

M_C : massa zat C

V_T : volume total campuran

b. Konsentrasi Molar

Konsentrasi molar merupakan perbandingan mol zat terlarut dibagi dengan volume total larutan. Rumus menghitung konsentrasi molar sebagai berikut :

$$C_A = \frac{n_A}{V_T}$$

Dimana :

C_A : konsentrasi molar A

n_A : mol zat A

V_T : volume total campuran

Konsentrasi molar dapat dihitung menggunakan fraksi molar. Fraksi molar adalah perbandingan mol suatu zat dengan mol total campuran. Fraksi molar dibedakan sesuai dengan fasenya. Fraksi molar untuk fase cair dinotasikan dengan simbol x,

fraksi molar fase gas dinotasikan dengan simbol y . Konsentrasi molar zat pada fase cair dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

$$C_A = x_A \cdot C_T$$

$$x_A = \frac{n_A}{n_T}$$

Dengan :

C_A : konsentrasi molar A

x_A : fraksi mol A

n_A : mol zat A

V_T : volume total campuran

n_T : mol total campuran

Konsentrasi fase gas sering kali dinyatakan dengan tekanan parsialnya. Jika P berkisar 1 atm maka gas akan mengikuti hukum gas ideal :

$$P V = n RT$$

Konsentrasi adalah pembagian mol dan volume, sehingga persamaan ideal dapat dirubah menjadi konsentrasi sebagai berikut :

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

Pada gas konsentrasi dapat dihitung dari tekanan parsial gas (P_A) tersebut. Persamaan gas ideal berubah menjadi :

$$P_A = \frac{n_A R \cdot T}{P}$$

$$C_A = \frac{P_A}{R \cdot T}$$

Tekanan parsial gas merupakan hasil perkalian dari perbandingan mol A dengan mol total dikali tekanan total, perbandingan mol A dengan mol total dapat dinotasikan sebagai fraksi mol gas dengan simbol y_A sehingga rumus menjadi sebagai berikut :

$$C_A = \frac{n_A}{n} \frac{P}{R \cdot T}$$

$$C_A = y_A \frac{P}{R \cdot T}$$

Keterangan rumus :

C_A : konsentrasi zat A

C : konsentrasi total larutan

P : tekanan total sistem

P_A : tekanan parsial gas A

R : konstanta gas ideal

T : suhu

n_A : mol zat A

n : mol total campuran

y_A : fraksi mol gas A

3. Fluks dan Hukum Ficks

Fluks: banyaknya suatu komponen baik massa maupun mol yang melintas satu satuan luas persatuan waktu. Fluks dapat didasarkan pada suatu koordinat yang tetap di dalam suatu ruangan atau didasarkan pada suatu koordinat yang bergerak dengan

kecepatan rata-rata massa atau kecepatan rata-rata molar. Fluks sangat erat kaitannya dengan Hukum Ficks tentang difusi. Persamaan Hukum Ficks sebagai berikut :

$$J_A^* = -cD_{AB} \Delta x_A$$

Keterangan :

Fluks difusi molar, J_A^*

Difusivitas, D, dalam sistem biner / dua komponen, $D_{AB} = D_B$

Spesies A berdifusi (bergerak relatif dalam campuran) dalam arah menurun fraksi mol A. Bentuk Hukum Pertama Fick dalam bentuk N_A , fluks molar relatif terhadap koordinat stationer. Pernyataan matematika yang sepadan dengan Fick sebagai berikut :

$$N_A = x_A (N_A + N_B) - c D_{AB} \Delta x_A$$

Satuan difusivitas massa D_{AB} adalah satuan luas per waktu seperti $\text{cm}^2 \text{ sec}^{-1}$ atau $\text{ft}^2 \text{ hr}^{-1}$

$$j_{Ay} = -D_{AB} \frac{d}{dy} (\rho_A)$$

Difusivitas untuk cairan dari percobaan yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Koefisien Difusivitas Cairan

A	B	T (°C)	x _A	$D_{AB} \times 10^6 (\text{cm}^2/\text{s})$
Klorobenzena	Bromobenzena	10,01	0,0332	1,007
			0,2642	1,069

A	B	T (°C)	x _A	D _{AB} × 10 ⁶ (cm ² /s)
			0,5122	1,146
			0,7617	1,291
			0,9652	1,291
		39,97	0,0332	1,584
			0,2642	1,691
			0,5122	1,806
			0,7617	1,902
			0,9652	1,996
Etanol	Air	25	0,05	1,13
			0,275	1,13
			0,50	0,41
			0,70	0,90
			0,95	2,20
Air	n-Butanol	30	0,131	1,24
			0,222	0,920
			0,358	0,560
			0,454	0,437
			0,524	0,267

Sumber :

Difusivitas untuk padatan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Koefisien Difusivitas Padatan

Sistem	T (°C)	D _{AB} (cm ² /s)
He dalam SiO ₂	20	2,4-5,5x10 ⁻¹⁰
He dalam pyrex	20	4,5 x 10 ⁻¹¹
	500	2 x 10 ⁻⁸
H ₂ dalam SiO ₂	500	0,6-2,1 x 10 ⁻⁸
H ₂ dalam Ni	85	1,16 x 10 ⁻⁸
	165	10,5 x 10 ⁻⁸
Bi dalam Pb	20	1,1 x 10 ⁻¹⁶
Hg dalam Pb	20	2,5 x 10 ⁻¹⁵
Sb dalam Ag	20	3,5 x 10 ⁻²¹
Al in Cu	20	1,3 x 10 ⁻³⁰
Cd dalam Cu	20	2,7 x 10 ⁻¹⁵

Sumber : Welty, J, 2008

Dari data koefisien difusivitas yang telah disajikan dapat disimpulkan ada beberapa faktor yang mempengaruhi difusivitas, antara lain :

- Temperatur : semakin tinggi temperatur, difusivitas semakin besar
- Kerapatan molekul : semakin rapat molekul zat, maka semakin kecil difusivitasnya.
Hal ini dibuktikan dengan difusivitas padat paling kecil diantara cair dan gas.

Kerapatan molekul padatan paling besar diantara 3 zat tersebut. Semakin tinggi koefisien difusivitas, maka semakin mudah zat tersebut untuk berdifusi.

- c. Koefisien difusivitas cairan selain temperatur dan kerapatan molekul juga konsentrasi zat yang terlarut atau fraksi mol zat.

4. Koefisien Difusivitas

Koefisien difusi merupakan sifat spesifik sistem yang tergantung pada suhu, tekanan, komposisi. Koefisien difusivitas dapat ditentukan dengan cara eksperimen, menggunakan data dari tabel, dan menggunakan pendekatan rumus.

- a. Koefisien difusi gas

Teori gas kinetik menunjukkan bahwa untuk gas, pengaruh komposisi terhadap koefisien difusi gas hanya sedikit. Cara penentuan koefisien difusivitas fase gas, antara lain :

- Data hasil percobaan yang telah ditabulasikan, seperti di Appendix J.1.(Welty), dan Table 6.2-1 (Geankoplis).
- Menggunakan persamaan pendekatan, seperti persamaan Hirschfelder, Bird, Fuller dan Spotz (pada buku ajar ini yang akan digunakan adalah persamaan dari Hirschfelder dan Fuller). Persamaan Hirschfelder, Bird, dan Spotz menggunakan potensial Lennard-Jones untuk memperkirakan difusivitas pasangan gas non polar dan tidak ada reaksi (Chem, Revs., 44, 205-231, 1949) dalam Welty dkk (1976).
- Melakukan percobaan.

- 1) Menentukan koefisien difusivitas gas menggunakan data tabel

Tabel yang digunakan dari Welty dan Geankoplis.

Tabel 3. Koefisien Difusivitas Pasangan Gas

Pasangan Gas	Temperatur (K)	$D_{AB} \times 10^6 (\text{cm}^2/\text{s})$
CO ₂ -N ₂ O	273,2	0,096
CO ₂ -CO	273,2	0,139
CO ₂ -N ₂	273,2	0,144
	288,2	0,158
	298,2	0,165
Ar-O ₂	293,2	0,20
H ₂ -SF ₆	298,2	0,420
H ₂ -CH ₄	298,2	0,726

Sumber : Welty, J, dan Geankoplis

2) Menggunakan pendekatan rumus Hirschfelder dan Fuller

Rumus pendekatan yang digunakan sebagai berikut :

$$D_{AB} = \frac{0,001858 T^{1,5} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{0,5}}{P \sigma_{AB}^2 \Omega_{AB}}$$

Keterangan :

D_{AB} : koefisien difusivitas gas satuan luas per satuan waktu (cm^2/detik)

T : temperatur

M_A : massa molar zat A

M_B : massa molar zat B

P : tekanan

σ_{AB} : diameter tumbukan, parameter Lennard-Jones

Ω : intergral tumbukan (Collision integral) yaitu fungsi yang tak berdimensi

Ω fungsi dari $\frac{\kappa T}{\epsilon_{AB}}$ (tersedia tabel hubungan Ω dengan $\frac{\kappa T}{\epsilon_{AB}}$)

K : konstanta Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-16}$ erg/K)

ϵ_{AB} : energi interaksi molekul sistem AB (Erg)

Untuk menentukan σ_{AB} menggunakan rumus :

$$\sigma_{AB} = \frac{(\sigma_A + \sigma_B)}{2}$$

σ_A dan σ_B dapat dicari dari tabel namun juga dapat dihitung menggunakan rumus berikut

$$\epsilon_{AB} = \sqrt{\epsilon_A \cdot \epsilon_B}$$

Contoh Soal 1.1

Evaluasi koefisien difusivitas karbondioksida di udara 20°C dan tekanan 1 atm.

Bandingkan dengan tabel J.1.

Penyelesaian

Data yang diperlukan :

T, P, M_A , M_B , Ω_{AB} , σ_{AB} , T dan P diketahui di soal

M_A dan M_B dari SPU diperoleh nilai

$$M_A = 1 \cdot ArC + 2 \cdot ArO_2 = 12 + 2(16) = 44 \text{ g/mol}$$

$$M_B = 0,79 \cdot ArN_2 + 0,21 \cdot ArO_2 = 0,79(28) + 0,21(32) = 28,84 \text{ g/mol} \approx 29 \text{ g/mol}$$

$\sigma_A, \sigma_B, \epsilon_A/\kappa, \epsilon_B/\kappa$ diperoleh dari Table 4 (Appendix K Welty, 2008)

Tabel 4. Konstanta Gaya Lennard-Jones dari Data Viskositas

Compound	Formula	$\epsilon_A/\kappa, \text{ in (K)}$	$\sigma, \text{ in } \text{\AA}$
Acetylene	C ₂ H ₂	185	4.221
Air		97	3.617
Argon	A	124	3.418
Arsine	AsH ₃	281	4.06
Benzene	C ₆ H ₆	440	5.270
Bromine	Br ₂	520	4.268
i-Butane	C ₄ H ₁₀	313	5.341
n-Butane	C ₄ H ₁₀	410	4.997
Carbon dioxide	CO ₂	190	3.996
Carbon disulfide	CS ₂	488	4.438
Carbon monoxide	CO	110	3.590
Carbon tetrachloride	CCl ₄	327	5.881
Carbonyl sulfide	COS	335	4.13

Dari tabel 4 diperoleh nilai $\sigma, \epsilon/\kappa$ karbondioksida dan air sebagai berikut

Komponen	$\sigma (\text{\AA})$	$\epsilon/\kappa (\text{K})$
Karbondioksida (A)	3,996	190
Udara (B)	3,617	97

Dari data tersebut dapat dihitung σ_{AB} dan ϵ_{AB}/κ

$$\sigma_{AB} = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} = \frac{3,996 + 3,167}{2} = 3,806 \text{ \AA}$$

$$\epsilon_{AB}/\kappa = \sqrt{(\epsilon_A/\kappa)(\epsilon_B/\kappa)} = \sqrt{(190)(97)} = 136 \text{ K}$$

Mencari nilai $\frac{\kappa T}{\epsilon_{AB}}$

$$T = 20^\circ\text{C} + 273 = 293 \text{ K}, P = 1 \text{ atm}$$

$$\frac{\epsilon_{AB}}{kT} = \frac{136}{293} = 0,463$$

$$\frac{kT}{\epsilon_{AB}} = \frac{1}{0,463} = 2,16$$

Cara menentukan Ω_{AB} dengan membaca tabel K.1 (Welty, 2008) Ω_D dengan

$$\frac{kT}{\epsilon_{AB}}$$

Ω_D yang digunakan karena yang akan kita hitung adalah difusivitas

Tabel 5. Integral Tumbukan berdasarkan Potensial Lennard-Jones

$\kappa T/\epsilon$	$\Omega_\mu = \Omega_k$ (for viscosity and thermal conductivity)	Ω_D (for mass diffusivity)	kT/ϵ	$\Omega_\mu = \Omega_k$ (for viscosity and thermal conductivity)	Ω_D (for mass diffusivity)
0.30	2.785	2.662	1.80	1.234	1.128
0.35	2.628	2.476	1.85	1.209	1.105
0.40	2.492	2.318	1.90	1.197	1.094
0.45	2.368	2.184	1.95	1.186	1.084
0.50	2.257	2.066	2.00	1.175	1.075
0.55	2.156	1.966	2.10	1.156	1.057
0.60	2.065	1.877	2.20	1.138	1.041
0.65	1.982	1.798	2.30	1.122	1.026
0.70	1.908	1.729	2.40	1.107	1.012
0.75	1.841	1.667	2.50	1.093	0.9996
0.80	1.780	1.612	2.60	1.081	0.9878
0.85	1.725	1.562	2.70	1.069	0.9770
0.90	1.675	1.517	2.80	1.058	0.9672
0.95	1.629	1.476	2.90	1.048	0.9576
1.00	1.587	1.439	3.00	1.039	0.9490
1.05	1.549	1.406	3.10	1.030	0.9406
1.10	1.514	1.375	3.20	1.022	0.9328
1.15	1.482	1.346	3.30	1.014	0.9256
1.20	1.452	1.320	3.40	1.007	0.9186
1.25	1.424	1.296	3.50	0.9999	0.9120
1.30	1.399	1.273	3.60	0.9932	0.9058
1.35	1.375	1.253	3.70	0.9870	0.8998
1.40	1.353	1.233	3.80	0.9811	0.8942
1.45	1.333	1.215	3.90	0.9755	0.8888
1.50	1.314	1.198	4.00	0.9700	0.8836
1.55	1.296	1.182	4.10	0.9649	0.8788
1.60	1.279	1.167	4.20	0.9600	0.8740
1.65	1.264	1.153	4.30	0.9553	0.8694

Karena nilai 1,26 tidak ada di tabel maka, Ω_{AB} dicari menggunakan tabel nilai interpolasi

$$\frac{\Omega_{AB} - \Omega_{AB\min}}{\Omega_{AB\max} - \Omega_{AB\min}} = \frac{(\in_{AB}/\kappa)_{AB} - (\in_{AB}/\kappa)_{\min}}{(\in_{AB}/\kappa)_{\max} - (\in_{AB}/\kappa)_{\min}}$$

$$\frac{\Omega_{AB} - 1,057}{1,041 - 1,057} = \frac{2,16 - 2,10}{2,20 - 2,10}$$

$$\Omega_{AB} = 1,047$$

$$D_{AB} = \frac{0,001858 T^{1,5} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{0,5}}{P \sigma_{AB}^2 \Omega_{AB}}$$

$$D_{AB} = \frac{0,001858 (293)^{1,5} \left(\frac{1}{44} + \frac{1}{29} \right)^{0,5}}{1(3,806)^2(1,047)} = 0,147 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

Rumus ke 2

$$D_{AB} \cdot P = 10^{-2} \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2 \cdot \text{atm/detik}$$

Hubungan difusivitas gas dengan tekanan berlaku untuk tekanan sedang sampai 25 atm umumnya $\Omega_{T1} \sim \Omega_{T2}$ sehingga

$$D_{AB} \text{ pada } T_2, P_2 = D_{AB} \text{ pada } T_1, P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{3/2} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \left(\frac{\Omega_{T1}}{\Omega_{T2}} \right)$$

Sehingga rumus untuk sistem atau campuran yang sama, koefisien difusi gas merupakan fungsi suhu dan tekanan.

$$D_{AB} \text{ pada } T_2, P_2 = D_{AB} \text{ pada } T_1, P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{3/2} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

Contoh soal 1.2

Tentukan koefisien difusivitas karbon dioksida pada suhu 20°C, tekanan 1 atm; jika diketahui difusivitas karbondioksida pada suhu 0°C=0,136 cm²/s !

Dari tabel J1 (Geankoplis,) nilai difusivitas (D_{AB}) untuk CO_2 di udara saat temperatur 273K, tekanan 1 atm sebesar $0,136 \text{ cm}^2/\text{s}$

$$D_{AB} \text{ pada } T_2, P_2 = D_{AB} \text{ pada } T_1, P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{3/2} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \left(\frac{\Omega_{T_1}}{\Omega_{T_2}} \right)$$

Pada $T_1 = 273 \text{ K}$, $\epsilon_{AB}/\kappa = 136$ (dari soal sebelumnya) sehingga $\epsilon_{AB}/\kappa T = 0,498$ dengan

Tabel 5 diperoleh $\Omega_{AB,T_1} = 1,074$

Pada $T_2 = 293 \text{ K}$, $\epsilon_{AB}/\kappa = 136$ (dari soal sebelumnya) sehingga $\epsilon_{AB}/\kappa T = 0,464$ dengan

Tabel 5 diperoleh $\Omega_{AB,T_2} = 1,047$

$$D_{AB} \text{ pada } T_2, P_2 = D_{AB} \text{ pada } T_1, P_1 \left(\frac{293}{273} \right)^{3/2} \left(\frac{1}{1} \right) \left(\frac{1,074}{1,047} \right) = 0,155 \text{ cm}^2/\text{s}$$

Metode Fuller

Karena persamaan Hirschfelder terlalu sulit untuk mengestimasi nilai diameter tumbukan, maka disederhanakan menggunakan metode Fuller

$$D_{AB} = \frac{1 \times 10^{-7} T^{1.75} (1/M_A + 1/M_B)^{1/2}}{P [(\sum v_A)^{1/3} + (\sum v_B)^{1/3}]^2}$$

Dimana,

T : temperatur

M_A : massa molekul zat A

M_B : massa molekul zat B

v_A : volume atom gas A

v_B : volume atom gas B

Nilai v_A dan v_B diperoleh dari Tabel 6 volume atom difusi berikut ini.

Tabel 6. Volume Difusi atom untuk Metode Fuller

Atomic and structural diffusion volume increments, v		
C	16.5 (C1)	19.5
H	1.98 (S)	17.0
O	5.48 Aromatic ring	-20.2
(N)	5.69 Heterocyclic ring	-20.2
Diffusion volumes for simple molecules, $\sum v$		
H ₂	7.07 CO	18.9
D ₂	6.70 CO ₂	26.9
He	2.88 N ₂ O	35.9
N ₂	17.9 NH ₃	14.9
O ₂	16.6 H ₂ O	12.7
Air	20.1 (CCl ₂ F ₂)	114.8
Ar	16.1 (SF ₆)	69.7
Kr	22.8 (Cl ₂)	37.7
(Xe)	37.9 (Br ₂)	67.2
Ne	5.59 (SO ₂)	41.1

* Parentheses indicate that the value listed is based on only a few data points.

Source: Reprinted with permission from E. N. Fuller, P. D. Schettler, and J. C. Giddings, *Ind. Eng. Chem.*, 58, 19 (1966). Copyright by the American Chemical Society.

Difusivitas pada campuran gas

$$D_{AB} = \frac{1}{\frac{Y_B}{D_{AB}} + \frac{Y_C}{D_{AC}} + \frac{Y_D}{D_{AD}} + \dots}$$

Y_B, Y_C, Y_D : fraksi mol komponen B,C,D dengan dasar bebas A (rasio)

Contoh Soal

Dalam perpindahan kimia gas dari silikon wafer (SiH₄), sebuah proses aliran gas dengan gas inert N₂ sebagai gas pembawa dengan komposisi sebagai berikut fraksi mol SiH₄ = 0,0075, H₂ = 0,015, N₂ = 0,9775.

Campuran gas berada pada suhu 900 K dan tekanan 100 Pa. Tentukan difusivitas silane (SiH₄) pada campuran gas.

Konstanta Lennard-Jones silane $\epsilon_A/\kappa = 207,6$ K, $\sigma_A = 4,08\text{\AA}$

SiH₄=A; H₂=B; N₂=C

y SiH₄ = 0,0075, yH₂ = 0,015, yN₂ = 0,9775

$$M_{SiH_4} = M_{Si} + 4 M_{H_2} = 28 + 4(1) = 32 \text{ kg/kgmol}$$

$$M_{N_2} = 28 \text{ kg/kgmol}, M_{H_2} = 2 \text{ kg/kgmol}$$

Dari Appendix K tabel K.2 diperoleh konstanta Lennard-Jones :

$$\sigma_A = 4,08 \text{ \AA}; \sigma_B = 2,968 \text{ \AA}; \sigma_C = 3,681 \text{ \AA}$$

$$\epsilon_A/\kappa = 207,6 \text{ K}; \epsilon_B/\kappa = 33,3 \text{ K}; \epsilon_C/\kappa = 91,5 \text{ K}$$

$$T = 900 \text{ K}; P = 100 \text{ Pa} = 10^{-3} \text{ atm}$$

Langkah penyelesaian

Tentukan difusivitas SiH_4 dengan N_2 dan SiH_4 dengan H_2 dengan pendekatan Hirschfelder

$$D_{AB} = \frac{0,001858 T^{1,5} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{0,5}}{P \sigma_{AB}^2 \Omega_{AB}}$$

sehingga diperoleh

$$\sigma_{AC}^2 = 15,06 \text{ \AA}^2, \sigma_{AB}^2 = 12,42 \text{ \AA}^2$$

$$\epsilon_{AC}/\kappa = 137,82 \text{ K}; \kappa T / \epsilon_{AC} = 6,5 \text{ K}^{-1}, \Omega_{AC} = 0,801$$

$$\epsilon_{AB}/\kappa = 83,15 \text{ K}; \kappa T / \epsilon_{AB} = 10,82 \text{ K}^{-1}, \Omega_{AB} = 0,736$$

$$D_{AC} SiH_4-N_2 = 1,09 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$D_{AB} SiH_4-H_2 = 4,06 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$y_{N_2}' = \frac{0,9775}{1 - 0,0075} = 0,9849$$

$$y_{H_2}' = \frac{0,015}{1 - 0,0075} = 0,0151$$

$$D_{\text{SiH}_4} = \frac{1}{\frac{y'_{\text{N}_2}}{D_{\text{SiH}_4-\text{N}_2}} + \frac{y'_{\text{H}_2}}{D_{\text{SiH}_4-\text{H}_2}}} = \frac{1}{\frac{0,9849}{1,09 \cdot 10^3} + \frac{0,0151}{4,06 \cdot 10^3}} = 1,10 \cdot 10^3 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

b. Koefisien difusi cairan

Koefisien difusi fase cair untuk campuran biner dapat ditentukan dengan beberapa cara, yaitu :

- 1) Menggunakan .data hasil percobaan yang telah ditabulasikan, seperti di Appendix J.2.(Welty), dan Table 6.3-1 (Geankoplis).
- 2) Menggunakan persamaan pendekatan, seperti persamaan Wilke-Chang.

Untuk sistem atau campuran yang sama, nilai koefisien difusi cairan merupakan fungsi konsentrasi.

Difusivitas merupakan fungsi dari temperatur, tekanan dan konsentrasi. Pernyataan ini dapat dituliskan dalam persamaan berikut :

$$D_{AB} = f(T, P, C)$$

$$D_{AB} \neq D_{BA}$$

Untuk larutan non-elektrolit yang encer, dapat diperkirakan dengan persamaan Wilke dan Chang.

$$\frac{D_{AB} \cdot \mu_B}{T} = \frac{7,4 \cdot 10^{-8} (\Phi_B M_B)^{0,5}}{v_A^{0,6}}$$

Keterangan :

D_{AB} : difusivitas cairan (cm^2/detik)

μ_B : viskositas larutan B (centipoise)

T : temperatur (K)

M_B : berat molekul solven B (g/gmol)

V_A : volume molar solut A (cm^3/gmol) pada *normal boiling point*

Φ_B : parameter asosiasi solven B

Nilai V_A dapat dilihat dari tabel berikut.

Tabel 7. Volume Atom untuk Molekul Kompleks Molekul untuk Senyawa Sederhana

Element	Atomic volume, in $\text{cm}^3/\text{g mol}$	Element	Atomic volume, in $\text{cm}^3/\text{g mol}$
Bromine	27.0	Oxygen, except as noted below	7.4
Carbon	14.8	Oxygen, in methyl esters	9.1
Chlorine	21.6	Oxygen, in methyl ethers	9.9
Hydrogen	3.7	Oxygen, in higher ethers	
Iodine	37.0	and other esters	11.0
Nitrogen, double bond	15.6	Oxygen, in acids	12.0
Nitrogen, in primary amines	10.5	Sulfur	25.6
Nitrogen, in secondary amines	12.0		

[†]G. Le Bas, *The Molecular Volumes of Liquid Chemical Compounds*, Longmans, Green & Company, Ltd., London, 1915.

Nilai Φ_B tergantung pada jenis solvennya, contoh untuk beberapa solven :

Tabel 8. Nilai Φ_B Untuk Beberapa Solven

Solven	Φ_B
Air	2,6
Metanol	1,9

Solven	Φ_B
Etanol	1,5
Benzena, eter, dan solven yang tidak berasosiasi	1

Untuk difusi dalam cairan kisaran harganya $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{detik}$.

Kesalahan persamaan Wilke & Chang dibandingkan dengan nilai eksperimen $\approx 13\%$.

Contoh Soal 1.3

Perkirakan difusivitas NH_3 dalam air pada 15°C , 1 atm dibandingkan dengan data pustaka

$$\Phi_B = 2,6; M_B = 18; \mu = 1,1 \text{ cp}; T = 288\text{K}$$

$$V_A = 10,5 + 3 \cdot 3,7 - 21,6 \text{ cm}^3/\text{gmol}$$

$$\frac{D_{AB} \cdot \mu_B}{T} = \frac{7,4 \cdot 10^{-8} (\Phi_B M_B)^{0,5}}{v_A^{0,6}}$$

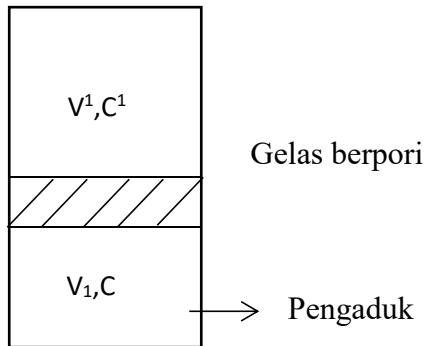
$$D_{AB} = \frac{7,4 \cdot 10^{-8} (\Phi_B M_B)^{0,5} T}{v_A^{0,6} \cdot \mu_B}$$

$$D_{AB} = \frac{7,4 \cdot 10^{-8} (2,6 \cdot 18)^{0,5} (288)}{2,16^{0,6} \cdot 1,1} = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{detik}$$

Dari pustaka $D_{AB} = 1,77 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{detik}$

3) Penentuan koefisien difusi dalam cairan secara eksperimen

Pengukuran dengan sel difusi yaitu suatu cairan encer ditempatkan terpisah dari cairan cukup pekat dibatasi membran berpori terbuat dari gelas (*sintered glass*)



Gambar 2. Ilustrasi Percobaan Penentuan Difusivitas Cairan

Panjang lintasan efektif= $K_t \cdot \delta$

δ : tebal garis berpori

K_t dicari dengan bahan lain yang sudah diketahui difusivitasnya :

$$N_A = \frac{V}{A} \frac{dC}{dt} = D_{AB} \frac{C - C'}{K_t \delta}$$

$$\ln \frac{C_0 - C'_0}{C - C'} = \frac{2 \in A}{K_t \delta V} D_{AB} t$$

Keterangan rumus :

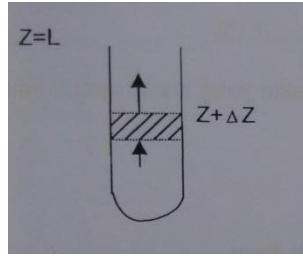
$\frac{2 \in A}{K_t \delta V}$: konstanta sel yang dicari dari bahan yang sudah diketahui difusivitasnya

C_0 dan C'_0 : konsentrasi awal

C dan C' : konsentrasi setelah t

Pengukuran dengan pipa kapiler

Cairan A ditempatkan dalam pipa kapiler di atasnya dialiri medium B, ilustrasi gambar di bawah ini :



Gambar 3. Ilustrasi Peristiwa Difusi dalam Pipa Kapiler

Dari Gambar 3 tersebut dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut :

$$N_{A|z} - N_{A|z+\Delta z} = \Delta z \frac{\partial C_A}{\partial t}$$

$$-\frac{D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial t} \Big|_z - (D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial t}) \Big|_{z+\Delta z}}{\Delta t} = \frac{\partial C_A}{\partial t}$$

$$D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial t^2} = \frac{\partial C_A}{\partial t}$$

Boundary Value Problem (BVP)

Kondisi awal : $C_A(z,0) = C_0$

Kondisi batas : BC:

1. $C_A(0,t) = \text{finite}$ atau $\frac{\partial C_A}{\partial t}(0, t) = 0$

2. $C_A(L,t) = 0$

3. $C_A(z,-) = 0$

Penyelesaian persamaan differensial di atas sebagai berikut :

$$C_A = \sum_0^{\infty} \frac{2C_0(-1)^{n-1}}{\binom{2n-1}{2L} n!} \exp\left[-\left(\frac{2n-1}{2L}\right)^2 \pi^2 D_{AB} t\right] \cos\left(\frac{2n-1}{2L}\right) \pi$$

$$\frac{C \text{ rata - rata}}{C_0} = E = \sum_0^{\infty} \frac{200}{\pi^2 L^2} \exp(-a^2 D_{AB} t) = \frac{800}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{AB} t}{4L^2}\right)$$

Untuk ekstraksi kurang dari 50%, dan $C_0=1M$, $C \text{ akhir} \geq 0,5$

$$E = 100 - 200 \sqrt{\frac{D_{AB} t}{\pi L^2}}$$

$$100 - E = 200 \sqrt{\frac{D_{AB} t}{\pi L^2}}$$

Dengan variasi L (panjang pipa kapiler) untuk waktu yang sama atau L yang sama untuk waktu difusi yang divariasi.

$$\log(100 - E) = \log 200 + \frac{1}{2} \log\left(\frac{D_{AB} t}{\pi L^2}\right)$$

Difusivitas (D_{AB}) dapat dicari menggunakan kurva $\log(100 - E)$ dan $\log \frac{1}{L^2}$

c. Difusi dalam padatan

Difusi dalam pori-pori terjadi karena 3 mekanisme yaitu difusi Fick, difusi Knudsen dan difusi permukaan.

Difusi Fick yang terjadi pada padatan dapat dihitung menggunakan rumus berikut ini :

$$J_A = -C \cdot D_{Ae} \cdot \nabla x_A$$

Dimana D_{AB} adalah koefisien difusi efektif A dalam pori

$$D_{Ae} = \frac{D_{AB}}{2L\psi} = \frac{D_{AB}}{\tau}$$

τ adalah tortuosity atau faktor koreksi panjang lintasan sebenarnya terhadap panjang lintasan nominal dari media berpori.

Jika pori-pori padatan cukup besar dan gas relatif berat yang berperan difusi Fick, yaitu difusi molekuler

Difusi Knudsen terjadi jika ukuran pori-pori sama atau berorder sama dengan lintasan bebas rerata molekul yang mendifusi

$$D_{\text{keff}} = \frac{19400 \epsilon^2}{\tau \psi \rho} \nu^{T/M}$$

Rumus difusi knudsen yang lain sebagai berikut :

$$Kn = \frac{\lambda}{d_{\text{pori}}} = \frac{\text{panjang jejak bebas rata - rata dari spesies yang berdifusi}}{\text{diameter pori}}$$

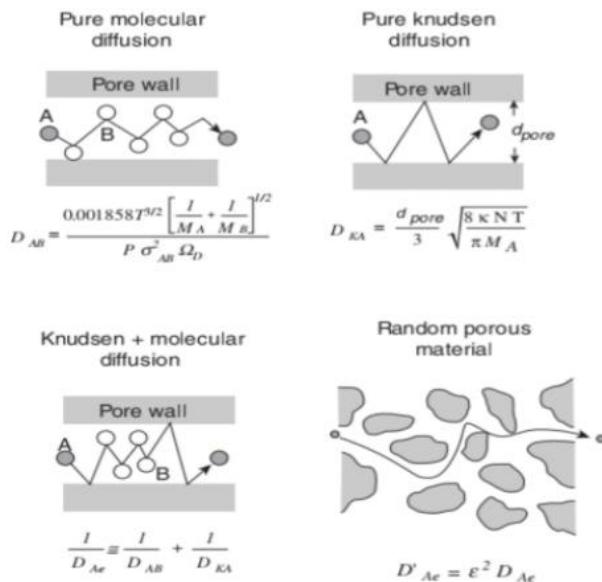
$$D_{AA^*} = \frac{\lambda_H}{3} = \frac{\lambda}{3} \sqrt{\frac{8\kappa NT}{\pi M_A}}$$

$$D_{KA^*} = \frac{d_{\text{pori}}}{3} u = \frac{d_{\text{pori}}}{3} \sqrt{\frac{8\kappa NT}{\pi M_A}} = 4850 d_{\text{pori}} \sqrt{\frac{T}{M_A}}$$

$$\frac{1}{D_{Ae}} = \frac{1}{D_{AB}} + \frac{1}{D_{KA}}$$

Difusi permukaan terjadi pada molekul-molekul yang telah diserap di permukaan dan bergerak karena gradien konsentrasi di permukaan. Umunya tak begitu penting kecuali penjerapan yang cukup besar.

Jenis-Jenis Difusi Pori



Gambar 4. Jenis-Jenis Pori

Contoh soal 1.4

Salah satu tahap dalam pembuatan serat optik adalah proses desposisi uap kimia dari silena ke permukaan bagian dalam suatu serat kaca berongga untuk membentuk lapisan tipis silikon-padat. Proses dilakukan pada suhu dan tekanan yang rendah, pori-pori serat optik kurang dari $20 \mu\text{m}$ ($1\mu\text{m}=1 \times 10^{-6} \text{ m}$), diameter serat kaca berongga yang dilapisi Si $10\mu\text{m}$, Perkirakan difusi Knudsen untuk silena dalam saluran serat pada kondisi sistem total $T=900\text{K}$, tekanan 100Pa . Silena diencerkan menjadi $1\%\text{mol}$ dalam He sebagai gas pembawa. Difusivitas silena dalam helium pada suhu 298 K dan tekanan 1 atm adalah $0,518 \text{ cm}^2/\text{s}$ dengan $\epsilon A / \kappa = 207,6 \text{ K}$, $\sigma A = 4,08 \text{ \AA}$, BM silena 32 g/mol .

Penyelesaian

Karena $DA_e < DKA$ maka resistensi seri, kemudian dihitung bilangan Knudsennya

$$\lambda = \frac{\kappa T}{\sqrt{2\pi\sigma_A^2 P}} = \frac{1,38 \cdot 10^{-16} \frac{erg}{K} \frac{1N\ m}{10^7 erg} 900\ K}{\sqrt{2\pi} \left(0,0408\ nm \frac{1\ m}{10^9 nm} \right)^2 100 \frac{N}{m^2}} = 1,68 \cdot 10^{-4} m = 168 \mu m$$

$$Kn = \frac{\lambda}{d_{\text{pori}}} = \frac{168 \mu m}{10 \mu m} = 16,8$$

Karena $Kn >> 1$ dan $D_{Ae} = D_{KA}$ maka difusi Knudsen mengendalikan transfer massa dalam serat optik, jika tidak ada pasokan bulk dari luar

$$D_{\text{SiH}_4\text{-He}} \Big|_{0,0\text{kPa}}^{900\text{K}} = 0,518 \frac{cm^2}{2} \left(\frac{900\ K}{298\ K} \right)^{1,5} \left(\frac{101,3\ kPa}{0,1\ kPa} \right) \left(\frac{0,885}{0,668} \right) = 3,64 \cdot 10^3 \frac{cm^2}{s}$$

$$D_{\text{KSiH}_4} = 4850 d_{\text{pori}} \sqrt{\frac{T}{M_A}} = 4850 (10^{-3}) \sqrt{\frac{900}{32_A}} = 25,7 \frac{cm^2}{s}$$

$$D_{\text{SiH}_4,e} = \frac{1}{\frac{1}{D_{\text{SiH}_4\text{-He}}} + \frac{1}{D_{\text{KSiH}_4}}} = \frac{1}{\frac{1}{3,64 \cdot 10^3} + \frac{1}{2,57}} = 25,5 \frac{cm^2}{s}$$

III. RINGKASAN MATERI

1. Transfer massa adalah gerakan molekul-molekul dari elemen fluida yang disebabkan adanya suatu gaya pendorong.
2. Konsentrasi suatu zat adalah jumlah zat terlarut dibagi jumlah volume larutan total.
3. Fluks: banyaknya suatu komponen baik massa maupun mol yang melintas satu satuan luas persatuuan waktu.
4. Persamaan Hukum Ficks sebagai berikut :

$$J_A^* = -c D_{AB} \Delta x_A$$

5. Koefisien difusi merupakan sifat spesifik sistem yang tergantung pada suhu, tekanan, komposisi.
6. Koefisien difusivitas dapat ditentukan dengan cara eksperimen, menggunakan data dari tabel, dan menggunakan pendekatan rumus.

IV. LATIHAN SOAL

1. Perkirakan nilai difusivitas cairan etanol dalam H₂O pada suhu 283 K menggunakan metode Wilke dan Chang !
2. Soal sama dengan contoh soal, hitung koefisien difusivitas karbondioksida dalam udara pada :
 - Temperatur 30°C
 - Temperatur 30°C dan tekanan 2 atm
3. Evaluasi koefisien difusivitas benzene 20°C dan tekanan 1 atm. Bandingkan dengan tabel J.1.

$$\epsilon/\kappa \text{ benzene} = 440 \text{ K}; \sigma \text{ benzene} = 5,270 \text{ \AA}$$

$$\epsilon/\kappa \text{ udara} = 97 \text{ K}; \sigma \text{ udara} = 3,617 \text{ \AA}$$

4. Perkirakan difusivitas asam asetat terlarut (CH₃COOH) dalam air pada suhu 282.9 K and at 298 K menggunakan metode Wilke-Chang. Kemudian bandingkan dengan Table 6.3-1.

BAB II

DIFUSI MOLEKULER DALAM KEADAAN TETAP

I. TUJUAN PEMBELAJARAN

Mahasiswa mampu menjelaskan dan menerapkan tentang difusi molekuler dalam keadaan tetap.

1. Difusi molekuler satu dimensi
2. Difusi molekuler fase gas
3. Difusi molekuler fase cair
4. Analogi proses transfer

II. MATERI PEMBELAJARAN

1. Prinsip Perpindahan Massa

Macam-macam jenis transfer massa (difusi) :

- a. Difusi molekuler.
- b. Difusi antar fase satu film (difusi dalam aliran turbulen).
- c. Difusi antar fase dua film

2. Difusi Molekuler

- Difusi molekuler merupakan transfer massa yang disebabkan gerakan molekuler secara acak dalam fluida diam, atau dalam fluida yang mengalir secara laminer.
- Transfer molekuler juga disebut transfer molekul dalam satu fase.

- Gerak molekul ini disebabkan karena adanya gradien atau perbedaan konsentrasi. Difusi molekuler dapat terjadi di fluida (gas atau cairan) dan di dalam padatan.
- Difusi molekuler di dalam padatan lebih lambat daripada di dalam fluida, hal ini karena tidak ada gerak padatan dalam padatan.

Transfer massa (difusi) molekuler dalam fluida diam/ laminar mengikuti hukum Fick. Ditinjau difusi A dalam campuran biner (A+B) sepanjang Z :

1 —————— 2

Keadaan 1 :

C_{A1}

C_{B1}

Z_1

Keadaan 2:

C_{A2}

C_{B2}

Z_2

Dengan $C_{A1} > C_{A2}$

Kecepatan perpindahan A dari titik 1 ke 2 mengikuti Hukum Fick

$$N_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dZ} + \frac{C_A}{C} (N_A + N_B)$$

Keterangan rumus :

N_A : fluks massa A, banyaknya A yang berpindah setiap satuan waktu dan setiap satuan luas transfer (satuan : mol A/ satuan waktu. satuan luas) atau massa A/ (satuan waktu. satuan luas))

N_B : Fluks massa B

D_{AB} : suatu faktor perbandingan yang disebut koefisien difusi atau difusivitas A ke B atau volum komponen yang dipindahkan sepanjang lintasan difusi per satuan waktu per satuan panjang (satuan m²/waktu)

Untuk campuran biner $D_{AB}=D_{BA}$

C_A : konsentrasi A

C_B : konsentrasi B

Z : jarak transfer

C : konsentrasi total

1 : posisi 1

2 : posisi 2

Penurunan Rumus

$$N_{A,z} = -C D_{AB} \frac{dy_A}{dz} + y_A (N_{A,z} + N_{B,z})$$

$$\frac{d}{dz} N_{B,z} = 0, N_{B,z} = 0$$

$$N_{A,z} = -\frac{cD_{AB}}{1-y_A} \frac{dy_A}{dz}$$

$$N_{A,z} \int_{z_1}^{z_2} dz = cD_{AB} \int_{y_1}^{y_2} -\frac{dy_A}{1-y_A}$$

$$N_{A,z} = \frac{cD_{AB}}{z_2 - z_1} \ln \frac{(1-y_{A2})}{(1-y_{A1})}$$

Komponen A diganti dengan log mean komponen B, persamaan menjadi

$$y_{B,lm} = \frac{(1-y_{A2}) - (1-y_{A1})}{\ln(1-y_{A2})/(1-y_{A1})} = \frac{y_{A1} - y_{A2}}{\ln(1-y_{A2})/(1-y_{A1})}$$

Rumus di atas dapat dirubah menjadi persamaan berikut :

$$N_{A,z} = \frac{cD_{AB}}{z_2 - z_1} \frac{y_{A1} - y_{A2}}{y_{B,lm}}$$

$$y_{B,lm} = \frac{y_{B2} - y_{B1}}{\ln(y_{B2}/y_{B1})}$$

Apabila komposisi (y) tidak diketahui, dapat menggunakan rumus tekanan parsial (p)

$$N_{A,z} = \frac{cD_{AB}P}{RT(z_2 - z_1)} \frac{p_{A1} - p_{A2}}{p_{B,lm}}$$

Contoh Soal 2.1

Difusi air yang menguap melalui udara yang tidak mendifusi. Suatu tabung berisi air dan bersuhu 293K. Tekanan udara total pada suhu itu adalah 1 atm dan dijaga tetap. Air menguap dan mendifusi melalui udara di dalam tabung. Jarak antara permukaan air dengan ujung tabung adalah 0,1524 m. Difusivitas uap air dalam udara pada 293K; 1 atm adalah $0,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tentukan fluks (Na) !

Penyelesaian

Diketahui : T= 293 K; P= 1atm; (z₂-z₁)= 0,1524 m; D_{AB}= $0,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Ditanya N_{A,z}...?

Jawab :

cari C dan tekanan parsial uap air pada suhu 293K 0,024 atm

PV=nRT; y_{A2}=0

$$N_{A,z} = \frac{cD_{AB}}{(z_2 - z_1)} \ln \frac{(1 - y_{A2})}{(1 - y_{A1})}$$

$$C = \frac{P}{RT} = \frac{1 \text{ atm}}{0,082 \cdot m^3 \text{ atm/mol K} \cdot 293 \text{ K}} = 0,041 \text{ kmol/m}^3$$

$$y_{A1} = \frac{P_A}{P} = 0,024$$

$$N_{A,z} = \frac{0,041 \cdot 0,25 \cdot 10^{-4}}{0,1524} \ln \frac{(1-0)}{(1-0,024)} = 0,0016 \text{ kmol/m}^2 \text{ s}$$

Contoh soal 2.2

Suatu tangki berdiameter 3 m berisi cairan toluen (C_7H_8) pada 30°C dan tekanan uapnya 0,0526 atm. Ketika tangki ini dibuka sehingga berkонтак dengan udara, difusi toluen ke udara diasumsi terjadi pada lapisan setebal 0,001 m. Koefisien difusi toluen ke udara pada kondisi ini adalah $0.88 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Konstanta gas adalah $0,082 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{atm}/(\text{gmol} \cdot \text{K})$. Tentukan kecepatan hilangnya toluene dalam kg setiap harinya.

Penyelesaian

Diketahui : $d= 3 \text{ m}$; toluene=A; $P=1 \text{ atm}$; $p_A= 0,0526 \text{ atm}$; $(z_2-z_1)=0,001 \text{ m}$; $D_{AB}=0.88 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; $R=0,082 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{atm}/(\text{gmol} \cdot \text{K})$

Ditanya : v penguapan?

Jawaban :

$$v \text{ penguapan} = N_A \times A$$

cari N_A dengan cara sebelumnya

$$N_{A,z} = \frac{cD_{AB}}{(z_2 - z_1)} \ln \frac{(1 - y_{A2})}{(1 - y_{A1})}$$

$$y_{A2} = 0$$

$$y_{A1} = \frac{0,0526 \text{ atm}}{1 \text{ atm}} = 0,0526 \text{ atm}$$

$$C = \frac{P}{R \cdot T} = \frac{1 \text{ atm}}{0,082 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{atm/gmol} \cdot 303\text{K}} = 40,2479 \text{ gmol/m}^{-3}$$

$$N_{A,z} = \frac{40,2479 \cdot 0,88 \cdot 10^{-5}}{0,001} \ln \frac{(1 - 0)}{(1 - 0,0526)} = 3,5418 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0540 = 1,9126 \cdot 10^{-5} \text{ gmol/m}^{-2}\text{s}$$

$$\text{BM C}_7\text{H}_8 = 7 \cdot 12 + 8 \cdot 1 = 92 \text{ g/gmol. } \frac{1\text{kg}}{1000 \text{ g}} = 0,092 \text{ kg/gmol}$$

N_A dikonversi dalam $\text{kg/m}^{-2}\text{s}$

$$N_A = N_A (\text{gmol/m}^{-2}\text{s}). \text{ BM} = 1,9126 \cdot 10^{-5} \cdot 0,092 = 1,7596 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^{-2}\text{s}$$

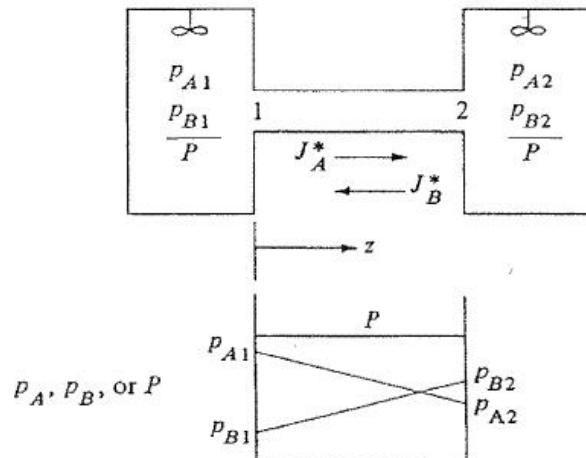
$$\text{A permukaan tangki; A lingkaran} = \frac{\Pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (3)^2}{4} = 7,065 \text{ m}^2$$

$$v \text{ penguapan} = N_A \cdot A = 1,7596 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^{-2}\text{s} \cdot 7,065 \text{ m}^2 \cdot \frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ hari}}$$

$$v \text{ penguapan} = 1,0741 \text{ kg/hari}$$

3. Difusi Molekular Gas

Equimolar counter diffusion (A dan B mendifusi sama cepat dan berlawanan arah)



Gambar 5. Ilustrasi Difusi Berlawanan Arah

Rumus untuk difusi molar berlawanan arah sebagai berikut :

$$J_A^* = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} = -J_B^* = -(-)D_{BA} \frac{dc_B}{dz}$$

Contoh soal 2.3

Gas amonia (A) mendifusi melalui pipa sepanjang 0,1 m yang terdapat gas N₂ (B) pada temperatur 298 K dan tekanan 1,0132 x 10⁵ Pa. Pada poin 1 kondisinya P_{A1} = 1,013 x 10⁴ Pa dan pada poin 2 kondisinya P_{A2} = 0,507x 10⁴ Pa, difusivitas D_{AB}= 0,230 x 10⁻⁴ m²/s. Tentukan fluks molar A dan B!

Penyelesaian :

Diketahui :

$$P = 1,0132 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$z_2 - z_1 = 0,10 \text{ m}$$

$$T = 298 \text{ K}$$

$$J_{A}^{*} = \frac{D_{AB}(p_{A1} - p_{A2})}{R.T(z_2 - z_1)} = \frac{(0,23 \cdot 10^{-4})(0,13 - 0,507) \cdot 10^{-4}}{8314(298)(0,10 - 0)} = 4,70 \cdot 10^{-7} \text{ kgmol A/s.m}^2$$

Untuk mencari fluks molar B maka harus menentukan p_{B1} dan p_{B2}

$$p_{B1} = P - p_{A1} = 1,0132 \times 10^5 \text{ Pa} - 1,013 \times 10^4 \text{ Pa} = 9,19 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$p_{B2} = P - p_{A2} = 1,0132 \times 10^5 \text{ Pa} - 0,507 \times 10^4 \text{ Pa} = 9,625 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$J_{B}^{*} = \frac{D_{AB}(p_{B1} - p_{B2})}{R.T(z_2 - z_1)} = \frac{(0,23 \cdot 10^{-4})(9,119 - 9,625) \cdot 10^{-4}}{8314(298)(0,10 - 0)} = -4,70 \cdot 10^{-7} \text{ kgmol B/s.m}^2$$

nilai negatif untuk fluks B dari poin 2 ke 1

4.Difusi Molekular Gas Pada Medium Tak Berdifusi (Diam)

Contoh peristiwa yang mengikuti keadaan ini antara lain penguapan komponen volatil di dalam botol terbuka, panjang lintasan difusi adalah jarak dari permukaan cairan sampai tutup botol. Komponen volatil akan mendifusi ke udara, tetapi udara tidak

mendifusi ke A. Komponen volatil tumpah di lantai, kemudian mendifusi ke udara, tetapi udara tidak mendifusi ke komponen volatil.

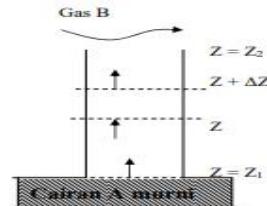
Penguapan komponen volatil dalam tangki.

Di alat transfer massa seperti absorpsi dan humidifikasi.

Contoh : Suatu tabung berisi cairan murni A. Bagian atas tabung terbuka dan berkontak dengan udara yang bergerak. Luas penampang pipa= S. P dan T dijaga tetap. Hitunglah kecepatan penguapan A

Penyelesaian :

- Gambar sketsa peristiwa transfer massa yang terjadi



Gambar 6. Ilustrasi Peristiwa Penguapan

- Menyusun persamaan kecepatan difusi

Penguapan A pada campuran biner (A+B)

Hukum Ficks

$$N_{A,z} = - D_{AB} \frac{dC_A}{dz} + \frac{C_A}{C} (N_A + N_B)$$

$$N_B = 0$$

$$N_{A,z} = - D_{AB} \frac{dC_A}{dz} + \frac{C_A}{C} (N_A)$$

$$N_{A,z} = - \frac{CD_{AB}}{1 - Y_A} \frac{dY_A}{dz}$$

Kondisi batas :

$$1. Z - Z_1 = Y_A - Y_{A1}$$

$$2. Z - Z_2 = Y_A - Y_{A2}$$

Kondisi batas yang sering dijumpai :

1. Pada kondisi A di fase gas (Y_{A1}) merupakan konsentrasi A di permukaan cairan. Pada keadaan ini konsentrasi A di fase gas berkesimbangan dengan konsentrasi A di fase cair. Tekanan parsial A di posisi ini (p_{A1}) sama dengan tekanan uap murni A (p_{A0}). Tekanan uap murni dievaluasi menggunakan persamaan Antoine (Appendiks D Coulson and Richardson Vol. 6)
2. Pada posisi Z_2 , konsentrasi A di fase gas (Y_{A2}) dapat mendekati 0, asumsi yang mendukung hal ini adalah udara selalu bergerak membawa A, sehingga seolah-olah A di posisi 2 selalu nol. Hal inilah yang menyebabkan penguapan terjadi terus menerus
3. Menyelesaikan persamaan diferensial (2) dengan kondisi batas tersebut

5. Difusi Molekular Pada Cairan

Equimolar counter diffusion (difusi berlawanan arah)

$$N_A = \frac{D_{AB}(c_{A1} - c_{A2})}{z_2 - z_1} = \frac{D_{AB} c_{av}(x_{A1} - x_{A2})}{z_2 - z_1}$$

Keterangan rumus :

N_A : flux A (kg mol A/ s. m²)

D_{AB} : koefisien difusivitas A dalam B (m²/s)

C_{A1} : konsentrasi pada keadaan 1

x_{A1} : fraksi mol keadaan 1

C_{Av} : konsentrasi rata-rata dicari menggunakan rumus berikut :

$$c_{av} = \left(\frac{\rho}{M} \right)_{av} = \left(\frac{\rho_1}{M_1} + \frac{\rho_2}{M_2} \right) / 2$$

Difusi molecular cairan pada keadaan diam (stagnan)

$$N_A = \frac{D_{AB}(C_{A1} - C_{A2})}{z_2 - z_1}$$

$$N_A = \frac{D_{AB} C_{av}}{(z_2 - z_1) x_{BM}} (x_{A1} - x_{A2})$$

$$x_{BM} = \frac{x_{B2} - x_{B1}}{\ln(x_{B2}/x_{B1})}$$

Contoh Soal 2.4 (cara sama dengan difusi gas)

Larutan etanol (A)-air (B) dalam bentuk stagnan film setebal 2 mm pada temperatur 293 K kontak pada suatu permukaan dengan solven organik yang mana etanol terlarut dan air tidak terlarut. Jika $N_B=0$, pada poin 1 konsentrasi etanol 16,8 % berat dan densitas 972,8 kg/m³. Pada poin 2 konsentrasi etanol 6,8% berat dan densitasnya 988,1 kg/m³. Difusivitas etanol $0,74 \times 10^{-9}$ m²/s. Hitunglah fluks A (N_A) dalam keadaan *steady state*!

Penyelesaian

Diketahui : etanol =A; Air =B; $(z_2-z_1)=2$ mm; $T=293K$; $\rho_{A1}=972,8 \text{ kg/m}^3$ $X_{A1}=16,8\%$ berat; $\rho_{A1}=988,1 \text{ kg/m}^3$ $X_{A2}=6,8\%$ berat;

$$D_{AB}=0,740 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

Ditanya : N_A ?

$$x_{A2} = \frac{6,8 / 46,05}{6,8 / 46,05 + 93,2 / 18,02} = \frac{0,1477}{0,1477 + 5,17} = 0,0277$$

Lalu $x_{B2}=1-0,0277=0,9723$, dengan cara yang sama x_{A1} dengan perhitungan x_{A2} , diperoleh nilai $x_{A2}=0,0732$, $x_{B1}=1-0,0732=0,9268$. Untuk menghitung berat molekul (M) pada keadaan 2 menggunakan rumus berikut :

$$M_2 = \frac{100 \text{ kg}}{(0,1477 + 5,17) \text{ kgmol}} = 18,75 \text{ kg/kgmol}$$

Dengan cara yang sama diperoleh $M_1= 20,07 \text{ kg/kgmol}$

Selanjutnya menghitung konsentrasi rata-rata (C_{AV})

$$c_{AV} = \frac{(\rho_1 / M_1) + (\rho_2 / M_2)}{2} = \frac{(972,8 / 20,07) + (988,1 / 18,75)}{2} = 50,6 \text{ kgmol/m}^3$$

Selanjutnya menghitung x_{BM} :

$$x_{BM} = \frac{x_{B1} + x_{B2}}{2} = \frac{0,9268 + 0,9723}{2} = 0,949$$

$$N_A = \frac{D_{AB} C_{AV}}{(z_2 - z_1) x_{BM}} (x_{A1} - x_{A2}) = 2 \frac{(0,74 \cdot 10^{-9})(50,6)}{(2/1000)0,949} (0,0732 - 0,0277) = 8,99 \cdot 10^{-7} \text{ kgmol/sm}^2$$

Difusi antar fase satu film (difusi dalam aliran turbulen)

- Pada operasi alat transfer massa, banyak melibatkan transfer massa antara 2 fase atau lebih yang dikontakkan.

- Ada beda konsentrasi di masing-masing fase.
- Untuk memprediksi konsentrasi solut di masing-masing fase pd keadaan setimbang, maka perlu data kesetimbangan berdasarkan hasil eksperimen.
- Beberapa hubungan atau persamaan konsentrasi kesetimbangan di kedua fase telah disajikan di buku-buku termodinamika.
- Variabel-varibel yang mempengaruhi kesetimbangan adalah T, P dan konsentrasi.

6.Difusi Antar Fase Satu Film

Hubungan kesetimbangan, yaitu :

1. Gas cair

Hubungan kesetimbangan: data kelarutan

Sering dijumpai di operasi alat-alat TM yang berdasarkan perbedaan kelarutan (absorber, stripper)

2. Cair cair

Hubungan kesetimbangan: data kelarutan

Sering dijumpai di operasi ekstraksi cair cair.

3. Uap cair

Hubungan kesetimbangan: titik didih, titik embun, tekanan uap, volatilitas.

Banyak dijumpai di operasi distilasi, alat-alat penukar panas dengan perubahan fase (*heat exchanger; condenser, vaporizer*).

4. Padat cair

Hubungan kesetimbangan: data kelarutan

Sering dijumpai di operasi absorber, *leaching*.

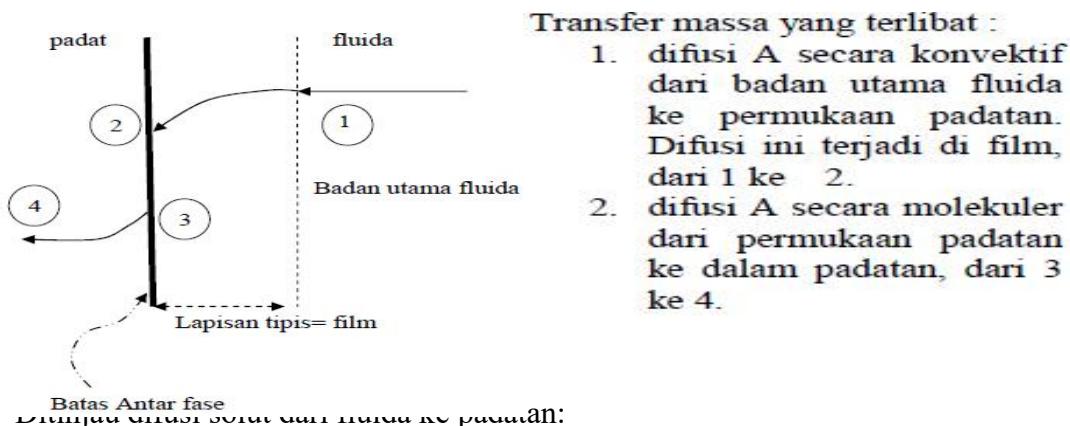
Transfer massa antar fase:

- a. Satu film, terjadi pada kontak fase padat dengan fluida.

Ditinjau difusi solut dari fluida ke padatan: arah transfer tergantung konsentrasi.

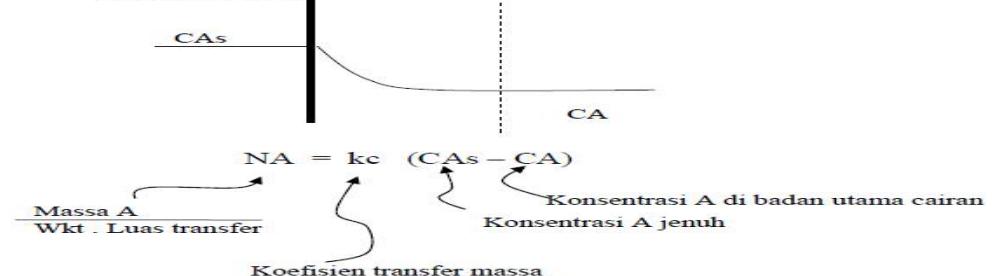
Contoh kasus ini yaitu, pelarutan gula dg pengadukan, penjerapan logam berat dengan arang.

Ditinjau difusi solut dari fluida ke padatan:



Kecepatan perpindahan solut (A) :

Padatan A murni



Nilai kc tergantung dari sifat padatan, sifat fluida, geometri alat, kecepatan pengadukan; $\frac{\text{satuan volum}}{\text{satuan waktu} \cdot \text{satuan luas transfer}}$

Gambar 7. Mekanisme Difusi Solut ke Padatan

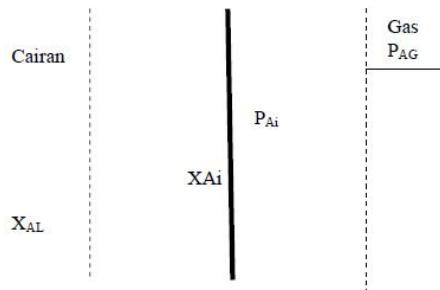
b. Dua film, terjadi pada kontak fase fluida dengan fluida

Hal yang membuat perpindahan massa antar fase menjadi lebih rumit ialah karena adanya perpindahan kalor dan ketidaksinambungan yang terdapat pada antarmuka, yang terjadi karena konsentrasi atau fraksi mol zat terlarut yang terdifusi hampir tidak pernah sama pada kedua sisi antarmuka itu.

Efisiensi pada operasi destilasi, absorpsi atau ekstraksi merupakan fungsi dari laju perpindahan massa dan koefisien perpindahan.

Difusi antar fase dua film

Ditinjau transfer massa solut (A) dari fluida I (gas) ke fluida 2 (gas)



Gambar 8. Ilustrasi Difusi melalui 2 Film

- transfer massa dari badan utama fase I ke permukaan antar fase
- transfer massa antar fase ke badan utama fase II
- di batas antar fase, tidak ada tahanan, sehingga terjadi keseimbangan.

$$P_{Ai} = f(X_{Ai}, \text{Keseimbangan})$$