

# Operasi Perpindahan Massa dan Panas

Gita Indah Budiarti, S.T., M.T.

Shinta Amelia, S.T., M.Eng.



**Sanksi Pelanggaran Pasal 113  
Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014  
Tentang Hak Cipta**

1. Setiap orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk penggunaan secara komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp. 100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk penggunaan secara komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp. 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3. Setiap orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk penggunaan secara komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp. 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. Setiap orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp. 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

# Operasi Perpindahan Massa dan Panas

Gita Indah Budiarti, S.T., M.T.

Shinta Amelia, S.T., M.Eng.



## Operasi Perpindahan Massa dan Panas

Copyright © 2022 Gita Indah Budiarti, Shinta Amelia

ISBN: xxx-xxx-xxx-xx-x

e-ISBN: xxx-xxx-xxx-xx-x

16 x 24 cm, xiv + 166 hlm

Cetakan Pertama, Mei 2022

Penulis: Gita Indah Budiarti, S.T., M.T. dan Shinta Amelia, S.T., M.Eng.

Editor: Dyah Intan P. dan Ratih Purwandari

Layout: Ratih Purwandari

Desain Cover: Hafidz Irfana

Diterbitkan oleh:

**UAD PRESS**

(Anggota IKAPI dan APPTI)

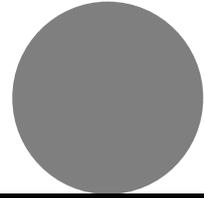
Alamat Penerbit:

Kampus II Universitas Ahmad Dahlan

Jl. Pramuka No. 42, Sidikan, Umbulharjo, Yogyakarta.

Telp. (0274) 563515, Phone (+62) 882 3949 9820

*All right reserved.* Semua hak cipta © dilindungi undang-undang. Tidak diperkenankan memproduksi ulang atau mengubah dalam bentuk apa pun melalui cara elektronik, mekanis, fotocopy, atau rekaman sebagian atau seluruh buku ini tanpa izin tertulis dari pemilik hak cipta.



## Prakata

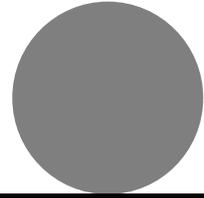
Dalam metode pembelajaran saat ini, mahasiswa dituntut untuk menjadi *center learning* atau pusat belajar. Untuk melatih mahasiswa menjadi sumber pembelajaran, diperlukan media pembelajaran yang efektif untuk memicu keaktifan mahasiswa dalam perkuliahan. Buku ajar merupakan salah satu media pembelajaran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

Mata kuliah Operasi Massa dan Panas (OPMP) merupakan mata kuliah inti teknik kimia tentang 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 tidak mencukupi apabila disampaikan hanya di kelas. Buku ajar ini terdiri atas materi berupa teori, penurunan rumus, ringkasan rumus-rumus penting, contoh soal, serta soal latihan atau studi kasus. Materi yang diulas dalam buku ini antara lain dasar perpindahan berupa pengertian perpindahan massa, momentum, dan panas, penyebab terjadinya fenomena tersebut, difusivitas, dan 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 diharapkan memiliki pengalaman belajar yang baru. Tidak hanya mendengarkan dosen, mereka juga dituntut untuk memahami materi secara mandiri dan mampu menemukan permasalahan. Permasalahan tersebut dapat disampaikan pada saat tatap muka di kelas, sehingga dapat meningkatkan keaktifan mahasiswa di kelas.

Yogyakarta, 31 Oktober 2020

Penulis



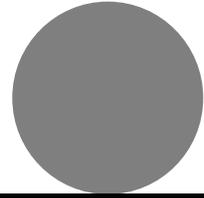
# Daftar Isi

Prakata	v
Daftar Isi	vii
Daftar Tabel	xi
Daftar Gambar	xiv
<b>Bab 1. Konsep Perpindahan Massa Difusional</b>	<b>1</b>
Tujuan Pembelajaran	1
<b>A. Pengertian Transfer Massa</b>	<b>2</b>
<b>B. Konsentrasi</b>	<b>4</b>
<b>C. Fluks dan Hukum Ficks</b>	<b>7</b>
<b>D. Koefisien Difusivitas</b>	<b>9</b>
Ringkasan Materi	25
Latihan Soal	25
<b>Bab 2. Difusi Molekuler dalam Keadaan Tetap</b>	<b>27</b>
Tujuan Pembelajaran	27
<b>A. Prinsip Perpindahan Massa</b>	<b>28</b>
<b>B. Difusi Molekuler</b>	<b>28</b>
<b>C. Difusi Molekular Gas</b>	<b>32</b>
<b>D. Difusi Molekular Gas pada Medium Tak Berdifusi     (Diam)</b>	<b>33</b>

E. Difusi Molekular pada Cairan	35
F. Difusi Antar Fase Satu Film	37
Ringkasan Materi	40
Latihan Soal	40
<b>Bab 3. Difusi Melalui Non Stagnan Film</b>	<b>41</b>
Tujuan Pembelajaran	41
A. Koefisien Transfer Massa Konvektif	42
B. Teori Lapisan Film	42
C. Transfer Massa Dua Fase	43
D. Difusi Olakan	47
E. Koefisien Perpindahan Massa Volumetrik	48
F. Analisis Dimensional	49
Ringkasan Materi	54
Latihan Soal	54
<b>Bab 4. Transfer Massa Antar Fase</b>	<b>57</b>
Tujuan Pembelajaran	57
A. Keseimbangan	58
B. Alat Transfer Massa	61
Rangkuman Materi	74
Latihan Soal	74
<b>Bab 5. Humidifikasi dan Dehumidifikasi</b>	<b>75</b>
Tujuan Pembelajaran	75
A. Humidifikasi	78
B. Titik Embun ( <i>Dew Point</i> ) dari Campuran Udara dan Uap Air	78
C. Panas Lembap ( <i>Humid Heat, Cs</i> ) dari Campuran Uap Air-Udara	79
D. Entalpi Total ( <i>Total Enthalpy</i> ) Campuran Uap Udara-Air	80

E. Bagan Kelembapan ( <i>Humidity Chart</i> ) Campuran Uap Air-Udara	80
F. Humidifikasi Kontinu <i>Cooling Towers</i> (Menara Pendingin)	87
Rangkuman Materi	94
Latihan Soal	96
<b>Bab 6. <i>Drying</i> (Pengeringan)</b>	<b>97</b>
Tujuan Pembelajaran	97
A. Cara Penghilangan Uap Air	98
B. Kandungan Air Kesetimbangan	98
C. Air Terikat dan Tidak Terikat	99
D. Air Bebas	99
E. Kurva Kecepatan Pengeringan	99
F. Waktu Pengeringan	111
Rangkuman Materi	112
Latihan Soal	113
<b>Bab 7. Evaporasi (Penguapan)</b>	<b>115</b>
Tujuan Pembelajaran	115
A. Jenis Evaporasi Berdasarkan Kondisi	116
B. Faktor yang Memengaruhi Proses Evaporasi	116
C. Jenis Evaporator	117
Rangkuman Materi	127
Latihan Soal	128
<b>Bab 8. Kristalisasi</b>	<b>129</b>
Tujuan Pembelajaran	129
A. Larutan Lewat Jenuh ( <i>Supersaturated</i> )	130
B. Pemekatan Liquid	130
C. Tahapan Kristalisasi	132
D. Yield dan Material Balance Kristalisasi	136

<b>E. Keseimbangan Panas Kristalisasi</b>	<b>138</b>
Rangkuman Materi	141
Latihan Soal	142
<b>Daftar Pustaka</b>	<b>143</b>
<b>Rencana Pembelajaran Semester Mata Kuliah Inti</b>	<b>145</b>
<b>Tentang Penulis</b>	<b>161</b>

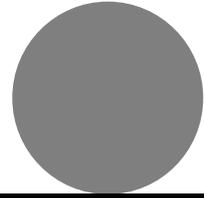


---

## Daftar Tabel

Tabel 1. Koefisien Difusivitas Cairan	8
Tabel 2. Koefisien Difusivitas Padatan	9
Tabel 3. Koefisien Difusivitas Pasangan Gas	10
Tabel 4. Konstanta Gaya Lennard-Jones dari Data Viskositas	12
Tabel 5. Integral Tumbukan berdasarkan Potensial Lennard-Jones	13
Tabel 6. Volume Difusi Atom untuk Metode Fuller	15
Tabel 7. Volume Atom untuk Molekul Kompleks Molekul untuk Senyawa Sederhana	18
Tabel 8. Nilai $\Phi_B$ Untuk Beberapa Solven	18
Tabel 9. Karakteristik Packing	71





## Daftar Gambar

Gambar 1.	Peristiwa Transfer Massa	2
Gambar 2.	Percobaan Penentuan Difusivitas Cairan	19
Gambar 3.	Peristiwa Difusi dalam Pipa Kapiler	20
Gambar 4.	Jenis-Jenis Pori	23
Gambar 5.	Difusi Berlawanan Arah	32
Gambar 6.	Peristiwa Penguapan	34
Gambar 7.	Mekanisme Difusi Solut ke Padatan	38
Gambar 8.	Difusi melalui 2 Film	39
Gambar 9.	Transfer Massa Dua Film	43
Gambar 10.	Perpindahan Massa (a) Fasa Gas (b) Fasa Cair	44
Gambar 11.	Gambar Menara Sembur	63
Gambar 12.	Bagian dari Menara Sembur	63
Gambar 13.	Menara Bahan Isian	65
Gambar 14.	Menara Gelembung	66
Gambar 15.	<i>Plate Tower</i>	67
Gambar 16.	<i>Sieve Tray</i>	68
Gambar 17.	Kurva kesetimbangan	70
Gambar 18.	Konsep Transfer Massa Humidifikasi dan Dehumidifikasi	76
Gambar 19.	Sistem Adiabatik Udara-Uap Air	83
Gambar 20.	Pengukuran Suhu <i>Wet Bulb</i>	85

Gambar 21.	Prinsip Kerja <i>Cooling Tower</i>	88
Gambar 22.	Profil Temperatur dan Konsentrasi <i>Cooling Tower</i>	89
Gambar 23.	Pola Aliran Perpindahan Massa pada <i>Cooling Tower</i>	91
Gambar 24.	Kurva Laju Pengeringan untuk Kondisi Pengeringan Konstan	102
Gambar 25.	<i>Falling Film Evaporator</i>	118
Gambar 26.	<i>Rising Film (Long Tube Vertical) Evaporator</i>	119
Gambar 27.	<i>Plate Evaporator</i>	120
Gambar 28.	<i>Multi-effect Evaporator</i>	120
Gambar 29.	<i>Single-effect Evaporator</i>	124
Gambar 30.	<i>Evaporator</i>	131
Gambar 31.	Skema Membran Separasi	131
Gambar 32.	Skema Pemekatan dengan Pembekuan	132
Gambar 33.	Skema Tahapan Kristalisasi	132
Gambar 34.	Kurva Kristalisasi	133
Gambar 35.	Pertumbuhan Kristal	134
Gambar 36.	Grafik Kelarutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ dalam Air	135

## Konsep Perpindahan Massa Difusional

### TUJUAN PEMBELAJARAN

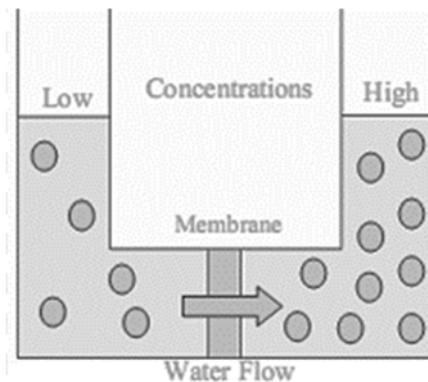
Mahasiswa dapat menjelaskan dan menerapkan tentang konsep dasar perpindahan massa difusional yang meliputi:

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

## A. 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.  
Peristiwa Transfer Massa

Proses-proses transfer di bidang teknik kimia meliputi:

### 1. 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.

### 2. 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).

## B. 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.

### 1. Konsentrasi Massa

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

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

$C_A$ : konsentrasi massa zat A

$m_A$ : zat terlarut

$V_T$ : 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:

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

$\omega_A$ : fraksi massa zat A

$m_A$ : massa A

$m_T$ : massa total.

Konsentrasi massa merupakan hasil perkalian dari fraksi massa dengan konsentrasi total campuran. Pernyataan tersebut dapat dinotasikan sebagai berikut:

$$C_A = \omega_A \cdot C_T$$

$C_A$ : konsentrasi massa zat A

$\omega_A$ : fraksi massa zat A

$C_T$ : konsentrasi total campuran.

Konsentrasi total adalah massa total campuran dibagi dengan volume total campuran. Pernyataan tersebut dapat dinotasikan sebagai berikut:

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

$C_T$  : konsentrasi total

$M_A$  : massa zat A

$M_B$  : massa zat B

$M_C$  : massa zat C

$V_T$  : volume total campuran

## 2. Konsentrasi Molar

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

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

$C_A$ : 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:

$$C_A = X_A \cdot C_T$$

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

$C_A$ : 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 seringkali dinyatakan dengan tekanan parsialnya. Jika  $P$  berkisar 1 atm maka gas akan mengikuti hukum gas ideal:

$$P V = n R T$$

Konsentrasi adalah pembagian mol dan volume, sehingga persamaan ideal dapat diubah 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:

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

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

$C_A$ : 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

### C. Fluks dan Hukum Ficks

Fluks adalah 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:

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

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
			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

Difusivitas untuk padatan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Koefisien Difusivitas Padatan

Sistem	T (°C)	$D_{AB}$ (cm <sup>2</sup> /s)
He dalam SiO <sub>2</sub>	20	$2,4-5,5 \times 10^{-10}$
He dalam pyrex	20	$4,5 \times 10^{-11}$
	500	$2 \times 10^{-8}$
H <sub>2</sub> dalam SiO <sub>2</sub>	500	$0,6-2,1 \times 10^{-8}$
H <sub>2</sub> dalam Ni	85	$1,16 \times 10^{-8}$
	165	$10,5 \times 10^{-8}$
Bi dalam Pb	20	$1,1 \times 10^{-16}$
Hg dalam Pb	20	$2,5 \times 10^{-15}$
Sb dalam Ag	20	$3,5 \times 10^{-21}$
Al in Cu	20	$1,3 \times 10^{-30}$
Cd dalam Cu	20	$2,7 \times 10^{-15}$

Sumber: Welty, J, 2008

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

1. Temperatur: semakin tinggi temperatur, difusivitas semakin besar
2. Kerapatan molekul: semakin rapat molekul zat, maka semakin kecil difusivitasnya. Hal ini dibuktikan dengan difusivitas padat paling kecil di antara cair dan gas. Kerapatan molekul padatan paling besar di antara tiga zat tersebut. Semakin tinggi koefisien difusivitas, maka semakin mudah zat tersebut untuk berdifusi.
3. Koefisien difusivitas cairan selain temperatur dan kerapatan molekul juga konsentrasi zat yang terlarut atau fraksi mol zat.

#### D. Koefisien Difusivitas

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

### 1. 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 Spatz (pada buku ajar ini yang akan digunakan adalah persamaan dari Hirschfelder dan Fuller). Persamaan Hirschfelder, Bird, dan Spatz 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
  - a. Menentukan koefisien difusivitas gas menggunakan data table 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 <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> O	273,2	0,096
CO <sub>2</sub> -CO	273,2	0,139
CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub>	273,2	0,144
	288,2	0,158
	298,2	0,165
Ar-O <sub>2</sub>	293,2	0,20
H <sub>2</sub> -SF <sub>6</sub>	298,2	0,420
H <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub>	298,2	0,726

Sumber: Welty, J, dan Geankoplis

- b. Menggunakan pendekatan rumus Hirschfelder dan Fuller.

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

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

$T$  : temperatur

$M_A$  : massa molar zat A

$M_B$  : massa molar zat B

$P$  : tekanan

$\sigma_{AB}$  : diameter tumbukan, parameter Lennard-Jones

$\Omega$  : intergral tumbukan (Collision integral) yaitu fungsi yang tak berdimensi

$\Omega$  fungsi dari  $\frac{kT}{\epsilon_{AB}}$  (tersedia tabel hubungan  $\Omega$  dengan  $\frac{kT}{\epsilon_{AB}}$ )

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

$\epsilon_{AB}$ : energi interaksi molekul sistem AB (Erg)

Untuk menentukan  $\sigma_{AB}$  menggunakan rumus:

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

$\sigma_A$  dan  $\sigma_B$  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  $20^\circ\text{C}$  dan tekanan 1 atm. Bandingkan dengan tabel J.1.

#### Penyelesaian

Data yang diperlukan:

$T$ ,  $P$ ,  $M_A$ ,  $M_B$ ,  $\Omega_{AB}$ ,  $\sigma_{AB}$ ,  $T$ , dan  $P$  diketahui di soal

$M_A$  dan  $M_B$  dari SPU diperoleh nilai

$$M_A = 1 \cdot \text{ArC} + 2 \text{ArO}_2 = 12 + 2(16) = 44 \text{ g/mol}$$

$$\begin{aligned} M_B &= 0,79 \cdot \text{ArN}_2 + 0,21 \cdot \text{ArO}_2 = 0,79(28) + 0,21(32) \\ &= 28,84 \text{ g/mol} \approx 29 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

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

Tabel 4. Konstanta Gaya Lennard-Jones dari Data Viskositas

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

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

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

Dari data tersebut dapat dihitung  $\sigma_{AB}$  dan  $\epsilon_{AB}/\kappa$

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

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

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

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

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

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

Cara menentukan  $\Omega_{AB}$  dengan membaca tabel K.1 (Welty, 2008)  $\Omega_D$  dengan  $\frac{kT}{\epsilon_{AB}}$  berikut:

$\Omega_D$  yang digunakan karena yang akan kita hitung adalah difusivitas.

Tabel 5. Integral Tumbukan berdasarkan Potensial Lennard-Jones

$kT/\epsilon$	$\Omega_\mu = \Omega_k$ (for viscosity and thermal conductivity)	$\Omega_D$ (for mass diffusivity)	$kT/\epsilon$	$\Omega_\mu = \Omega_k$ (for viscosity and thermal conductivity)	$\Omega_D$ (for mass diffusivity)
0.30	2.785	2.662	1.75	1.234	1.128
0.35	2.628	2.476	1.80	1.221	1.116
0.40	2.492	2.318	1.85	1.209	1.105
0.45	2.368	2.184	1.90	1.197	1.094
0.50	2.257	2.066	1.95	1.186	1.084
0.55	2.156	1.966	2.00	1.175	1.075
0.60	2.065	1.877	2.10	1.156	1.057
0.65	1.982	1.798	2.20	1.138	1.041
0.70	1.908	1.729	2.30	1.122	1.026
0.75	1.841	1.667	2.40	1.107	1.012
0.80	1.780	1.612	2.50	1.093	0.9996
0.85	1.725	1.562	2.60	1.081	0.9878
0.90	1.675	1.517	2.70	1.069	0.9770
0.95	1.629	1.476	2.80	1.058	0.9672
1.00	1.587	1.439	2.90	1.048	0.9576
1.05	1.549	1.406	3.00	1.039	0.9490
1.10	1.514	1.375	3.10	1.030	0.9406
1.15	1.482	1.346	3.20	1.022	0.9328
1.20	1.452	1.320	3.30	1.014	0.9256
1.25	1.424	1.296	3.40	1.007	0.9186
1.30	1.399	1.273	3.50	0.9999	0.9120
1.35	1.375	1.253	3.60	0.9932	0.9058
1.40	1.353	1.233	3.70	0.9870	0.8998
1.45	1.333	1.215	3.80	0.9811	0.8942
1.50	1.314	1.198	3.90	0.9755	0.8888
1.55	1.296	1.182	4.00	0.9700	0.8836
1.60	1.279	1.167	4.10	0.9649	0.8788
1.65	1.264	1.153	4.20	0.9600	0.8740
			4.30	0.9553	0.8694

Oleh karena nilai 1,26 tidak ada di table, maka  $\Omega_{AB}$  dicari menggunakan tabel nilai interpolasi

$$\frac{\Omega_{AB} - \Omega_{AB \min}}{\Omega_{AB \max} - \Omega_{AB \min}} = \frac{(\epsilon_{AB}/K)_{AB} - (\epsilon_{AB}/K)_{\min}}{(\epsilon_{AB}/K)_{\max} - (\epsilon_{AB}/K)_{\min}}$$

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

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

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

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

Rumus ke-2

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

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 cm<sup>2</sup>/s!

Dari tabel J1 (Geankoplis,) nilai difusivitas ( $D_{AB}$ ) untuk CO<sub>2</sub> di udara saat temperatur 273K, tekanan 1 atm sebesar 0,136 cm<sup>2</sup>/s

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

Pada  $T_1 = 273 \text{ K}$ ,  $\epsilon_{AB}/\kappa = 136$  (dari soal sebelumnya) sehingga  $\epsilon_{AB}/Kt = 0,498$  dengan Tabel 5 diperoleh  $\Omega_{AB,T1} = 1,074$

Pada  $T_2 = 293 \text{ K}$ ,  $\epsilon_{AB}/\kappa = 136$  (dari soal sebelumnya) sehingga  $\epsilon_{AB}/Kt = 0,464$  dengan Tabel 5 diperoleh  $\Omega_{AB,T1} = 1,047$

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

### Metode Fuller

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

$$D_{AB} = \frac{1 \times 10^{-7} T^{1,75} (1/M_A + 1/M_B)^{1/2}}{P[(\Sigma V_A)^{1/3} + (\Sigma V_B)^{1/3}]^2}$$

T : temperatur

M<sub>A</sub> : massa molekul zat A

M<sub>B</sub> : massa molekul zat B

V<sub>A</sub> : volume atom gas A

V<sub>B</sub> : volume atom gas B

Nilai V<sub>A</sub> dan V<sub>B</sub> diperoleh dari Tabel 6 volume atom difusi berikut ini.

Tabel 6. Volume Difusi atom untuk Metode Fuller

Atomic and structural diffusion volume increments, <i>v</i>			
C	16.5	(Cl)	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, $\Sigma v$			
H <sub>2</sub>	7.07	CO	18.9
D <sub>2</sub>	6.70	CO <sub>2</sub>	26.9
He	2.88	N <sub>2</sub> O	35.9
N <sub>2</sub>	17.9	NH <sub>3</sub>	14.9
O <sub>2</sub>	16.6	H <sub>2</sub> O	12.7
Air	20.1	(CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )	114.8
Ar	16.1	(SF <sub>6</sub> )	69.7
Kr	22.8	(Cl <sub>2</sub> )	37.7
(Xe)	37.9	(Br <sub>2</sub> )	67.2
Ne	5.59	(SO <sub>2</sub> )	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 ( $\text{SiH}_4$ ), sebuah proses aliran gas dengan gas inert  $\text{N}_2$  sebagai gas pembawa dengan komposisi sebagai berikut fraksi mol  $\text{SiH}_4 = 0,0075$ ,  $\text{H}_2 = 0,015$ ,  $\text{N}_2 = 0,9775$ .

Campuran gas berada pada suhu 900 K dan tekanan 100 Pa. Tentukan difusivitas silane ( $\text{SiH}_4$ ) pada campuran gas.

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

$$\text{SiH}_4 = A; \text{H}_2 = B; \text{N}_2 = C$$

$$y_{\text{SiH}_4} = 0,0075, y_{\text{H}_2} = 0,015, y_{\text{N}_2} = 0,9775$$

$$M_{\text{SiH}_4} = M_{\text{Si}} + 4 M_{\text{H}} = 28 + 4(1) = 32 \text{ kg/kgmol}$$

$$M_{\text{N}_2} = 28 \text{ kg/kgmol}, M_{\text{H}_2} = 2 \text{ kg/kgmol}$$

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

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

$$\varepsilon_A/\kappa = 207,6 \text{ K}; \varepsilon_B/\kappa = 33,3 \text{ K}; \varepsilon_C/\kappa = 91,5 \text{ K}$$

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

### Langkah penyelesaian

Tentukan difusivitas  $\text{SiH}_4$  dengan  $\text{N}_2$  dan  $\text{SiH}_4$  dengan  $\text{H}_2$  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

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

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

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

$$D_{AC} \text{ SiH}_4\text{-N}_2 = 1,09 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$D_{AB} \text{ SiH}_4\text{-H}_2 = 4,06 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$$

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

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

$$D_{\text{SiH}_4} = \frac{1}{\frac{y'_{N_2}}{D_{\text{SiH}_4\text{-N}_2}} + \frac{y'_{H_2}}{D_{\text{SiH}_4\text{-H}_2}}} = \frac{1}{\frac{0,9849}{1,09 \cdot 10^3} + \frac{0,0151}{4,06 \cdot 10^3}}$$

$$= 1,10 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$$

## 2. Koefisien difusi cairan

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

- Menggunakan data hasil percobaan yang telah ditabulasikan, seperti di Appendix J.2.(Welty), dan Tabel 6.3-1 (Geankoplis).
- 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 ditulis 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.

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

$D_{AB}$  : difusivitas cairan (cm<sup>2</sup>/detik)

$\mu_B$  : viskositas larutan B (centipoise)

T : temperatur (K)

$M_B$  : berat molekul solven B (g/gmol)

$V_A$  : volume molar solut A (cm<sup>3</sup>/gmol) pada *normal boiling point*

$\Phi_B$  : 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 cm <sup>3</sup> /g mol	Element	Atomic volume, in cm <sup>3</sup> /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		

<sup>1</sup>G. Le Bas, *The Molecular Volumes of Liquid Chemical Compounds*, Longmans, Green & Company, Ltd., London, 1915.

Nilai  $\Phi_B$  tergantung pada jenis solvennya, contoh untuk beberapa solven:

Tabel 8. Nilai  $\Phi_B$  untuk Beberapa Solven

Solven	$\Phi_B$
Air	2,6
Metanol	1,9
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  $\text{NH}_3$  dalam air pada  $15^\circ\text{C}$ , 1 atm dibandingkan dengan data pustaka

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

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

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

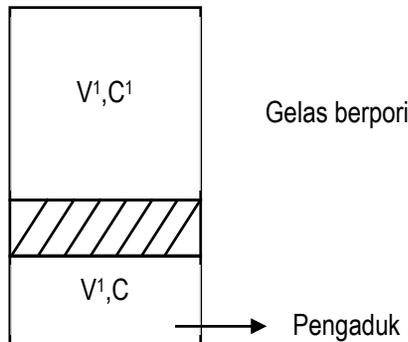
$$D_{AB} = \frac{7,4 \cdot 10^{-8} (\Phi_B M_B)^{0,5} T}{V_A^{0,6} \cdot \mu_B}$$

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

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

**c. 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 =  $K_t \cdot \delta$

$\delta$ : tebal garis berpori

$K_t$  dicari dengan bahan lain yang sudah diketahui difusivitasnya:

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

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

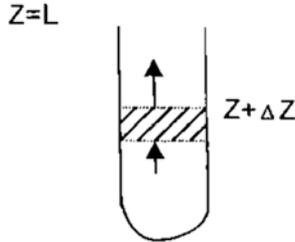
$\frac{2\epsilon A}{K_t \delta V}$  : konstanta sel yang dicari dari bahan yang sudah diketahui difusivitasnya

$C_0$  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:

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

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

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

*Boundary Value Problem (BVP)*

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

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:

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

$$\frac{C \text{ rata-rata}}{C_0} = E = \sum_0^{\infty} \frac{200}{a^2 L^2} \exp(-a^2 D_{AB} t)$$

$$= \frac{800}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(\frac{-(2n-1)^2 \pi^2 D_{AB} t}{4L^2}\right)$$

Untuk ekstraksi kurang dari 50%, dan  $C_0 = 1M$ ,  $C$  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  $\log \frac{1}{L^2}$ .

### 3. Difusi dalam padatan

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

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

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

$D_{AB}$  adalah koefisien difusi efektif A dalam pori.

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

$\tau$  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 berperanan difusi Fick, yaitu difusi molekuler.

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

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

Rumus difusi Knudsen yang lain sebagai berikut:

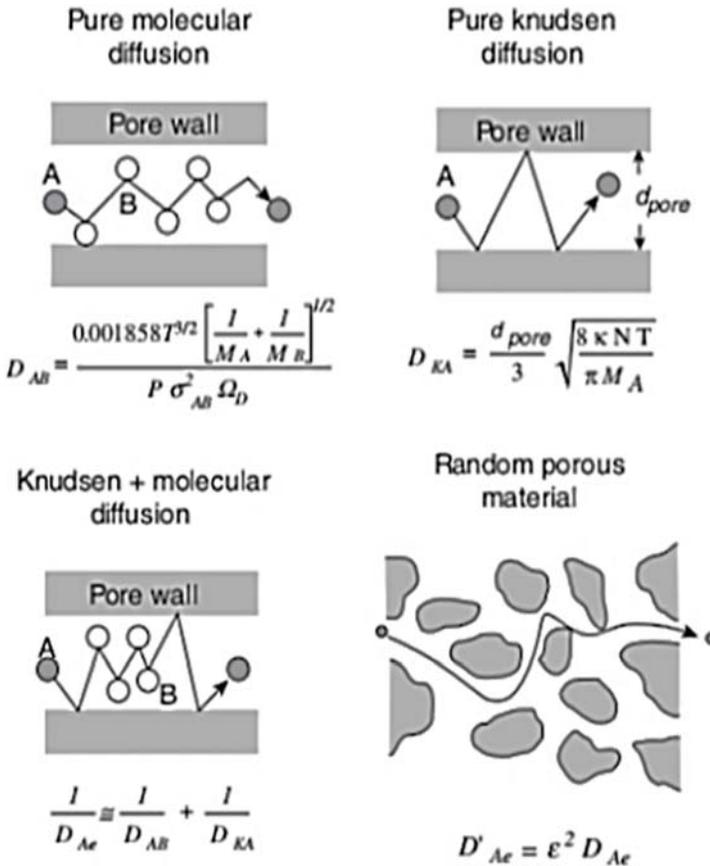
$$Kn = \frac{\lambda}{d_{pori}} = \frac{\text{panjang jejak bebas rata - rata dari spesies yang berdifusi}}{\text{diameter pori}}$$

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

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

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

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



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  $100\text{Pa}$ . Silena diencerkan menjadi  $1\%\text{mol}$  dalam He sebagai gas pembawa. Difusivitas silena dalam helium pada suhu  $298\text{ K}$  dan tekanan  $1\text{ atm}$  adalah  $0,518\text{ cm}^2/\text{s}$  dengan  $\epsilon A/\kappa = 207,6\text{ K}$ ,  $\sigma_A = 4,08\text{\AA}$ , BM silena  $32\text{ g/mol}$ .

**Penyelesaian:**

Karena  $D_{Ae} < D_{KA}$  maka resistensi seri, kemudian dihitung bilangan Knudsennya.

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2\pi\sigma_A^2 P}}$$

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

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

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

$$D_{\text{SiH}_4\text{-He}} \Big|_{0,06\text{Pa}}^{900\text{K}} = 0,518 \frac{\text{cm}^2}{2} \left(\frac{900\text{ K}}{298\text{ K}}\right)^{1,5} \left(\frac{101,3\text{ kPa}}{0,1\text{ kPa}}\right) \left(\frac{0,885}{0,668}\right) = 3,64 \cdot 10^3\text{cm}^2/\text{s}$$

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

$$D_{\text{SiH}_4,e} = \frac{1}{\frac{1}{D_{\text{SiH}_4\text{-He}}} + \frac{1}{D_{\text{KSiH}_4}}} = \frac{1}{\frac{1}{3,64 \cdot 10^3} + \frac{1}{25,7}} = 25,7\text{cm}^2/\text{s}$$

## 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 persatuan waktu.
4. Persamaan Hukum Ficks sebagai berikut:

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

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.

## Latihan Soal

1. Perkirakan nilai difusivitas cairan etanol dalam H<sub>2</sub>O 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.  
 $\epsilon/\kappa$  benzene = 440 K;  $\sigma$  benzene = 5,270 Å  
 $\epsilon/\kappa$  udara = 97 K;  $\sigma$  udara = 3,617 Å
4. Perkirakan difusivitas asam asetat terlarut (CH<sub>3</sub>COOH) dalam air pada suhu 282.9 K and at 298 K menggunakan metode Wilke-Chang. Kemudian bandingkan dengan Table 6.3-1.



## Difusi Molekuler dalam Keadaan Tetap

### 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

### A. Prinsip Perpindahan Massa

Macam-macam jenis transfer massa (difusi):

1. Difusi molekuler.
2. Difusi antar fase satu film (difusi dalam aliran turbulen).
3. Difusi antar fase dua film

### B. Difusi Molekuler

- Difusi molekuler merupakan transfer massa yang disebabkan gerakan molekuler secara acak dalam fluida diam, atau dalam fluida yang mengalir secara laminar.
- 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:	Keadaan 2:
$C_{A1}$	$C_{A2}$
$C_{B1}$	$C_{B2}$
$Z_1$	$Z_2$

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

Kecepatan perpindahan A dari titik 1 ke 2 mengikuti Hukum Fick

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

$N_A$  : 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 volume komponen yang dipindahkan sepanjang lintasan difusi per satuan waktu per satuan panjang (satuan  $m^2/waktu$ )

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

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

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

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

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

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

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 diubah menjadi persamaan berikut:

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

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

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 ( $N_A$ )!

#### Penyelesaian:

Diketahui:

$T = 293 \text{ K}$ ;  $P = 1 \text{ atm}$ ;  $(z_2 - z_1) = 0,1524 \text{ m}$ ;  $D_{AB} = 0,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Ditanya:  $N_{A,z} \dots?$

Jawab:

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

$PV = nRT$ ;  $y_{A2} = 0$

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

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

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

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

**Contoh soal 2.2**

Suatu tangki berdiameter 3 m berisi cairan toluen ( $C_7H_8$ ) pada  $30^\circ C$  dan tekanan uapnya  $0,0526$  atm. Ketika tangki ini dibuka sehingga berkontak dengan udara, difusi toluen ke udara diasumsi terjadi pada lapisan setebal  $0,001$  m. Koefisien difusi toluen ke udara pada kondisi ini adalah  $0,88 \times 10^{-5}$   $m^2/s$ . Konstanta gas adalah  $0,082 \times 10^{-3}$   $m^3 \cdot atm / (gmol \cdot K)$ . Tentukan kecepatan hilangnya toluene dalam kg setiap harinya.

**Penyelesaian:**

Diketahui:  $d = 3$  m; toluene = A;  $P = 1$  atm;  $p_A = 0,0526$  atm;  $(z_2 - z_1) = 0,001$  m;  $D_{AB} = 0,88 \times 10^{-5}$   $m^2/s$ ;  $R = 0,082 \times 10^{-3}$   $m^3 \cdot atm / (gmol \cdot K)$

Ditanya:  $v$  penguapan?

Jawab:

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

cari  $N_A$  dengan cara sebelumnya

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

$$y_{A2} = 0$$

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

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

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

$$= 1,9126 \cdot 10^{-5} \text{ gmol} / \text{m}^2 \text{ s}$$

$$BM_{C_7H_8} = 7 \cdot 12 + 8 \cdot 1 = \frac{92 \text{ g}}{\text{gmol}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 0,092 \text{ kg} / \text{gmol}$$

$N_A$  dikonversi dalam  $kg/m^2s$

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

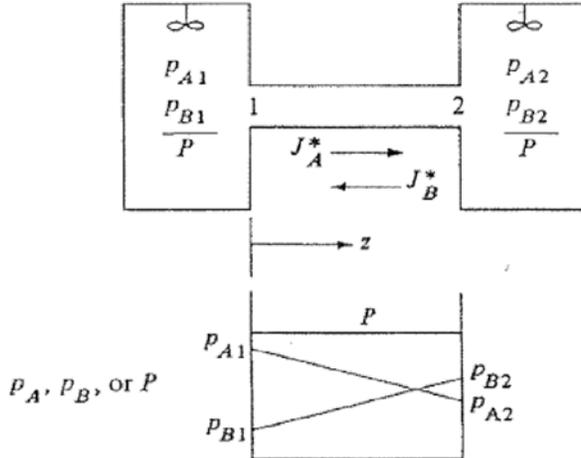
$$A \text{ permukaan tangki; } A \text{ lingkaran} = \frac{\Pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (3)^2}{4} = 7,065 \text{ m}^2$$

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

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

### C. Difusi Molekular Gas

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



Gambar 5.  
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 N<sub>2</sub> (B) pada temperatur 298 K dan tekanan 1,0132 x 10<sup>5</sup> Pa. Pada poin 1 kondisinya P<sub>A1</sub> = 1,013 x 10<sup>4</sup> Pa dan pada poin 2 kondisinya P<sub>A2</sub> = 0,507x 10<sup>4</sup> Pa, difusivitas D<sub>AB</sub> = 0,230 x 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>/s. Tentukan fluks molar A dan B!

#### Penyelesaian:

Diketahui:

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

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

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

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

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

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

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

$$J_A^* = \frac{D_{AB}(P_{A1} - P_{A2})}{R \cdot T(z_2 - z_1)} = \frac{(0,23 \cdot 10^{-4})((9,119 - 9,625) \cdot 10^{-4})}{8314(298)(0,10 - 0)} = -4,70 \cdot 10^{-7} \text{ kgmol A/s. m}^2$$

Nilai negatif untuk fluks B dari poin 2 ke 1

#### D. 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.

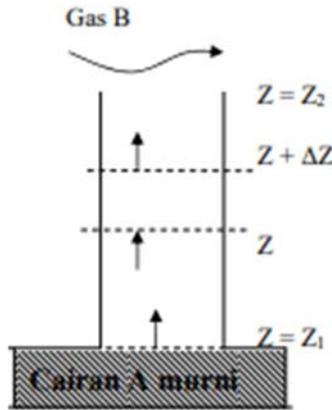
Penguapan komponen volatil dalam tangki.

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.  
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 berkeimbangan dengan konsentrasi A di fase cair. Tekanan parsial A di posisi ini ( $p_{A1}$ ) sama dengan tekanan uap murni A ( $p_{Ao}$ ). 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.

### E. Difusi Molekular Pada Cairan

*Equimolar counter diffusion* (difusi berlawanan arah)

$$N_A = \frac{D_{AB}(C_{A1} - C_{A2})}{Z_2 - Z_1} = \frac{D_{AB}C_{av}(x_{A1} - x_{A2})}{Z_2 - Z_1}$$

$N_A$  : flux A (kg mol A/s.  $m^2$ )

$D_{AB}$  : koefisien difusivitas A dalam B ( $m^2/s$ )

$C_{A1}$  : 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  $kg/m^3$ . Pada poin 2 konsentrasi etanol 6,8% berat dan densitasnya 988,1  $kg/m^3$ . Difusivitas etanol  $0,74 \times 10^{-9} m^2/s$ . Hitunglah fluks A ( $N_A$ ) dalam keadaan *steady state*!

**Penyelesaian:**

Diketahui: etanol = A; Air = B;  $(z_2 - z_1) = 2 \text{ mm}$ ;  $T = 293\text{K}$ ;  $\rho_{A1} = 972,8 \text{ kg/m}^3$   $X_{A1} = 16,8\%$  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 pada 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-variabel yang memengaruhi kesetimbangan adalah T, P, dan konsentrasi.

## F. Difusi Antar Fase Satu Film

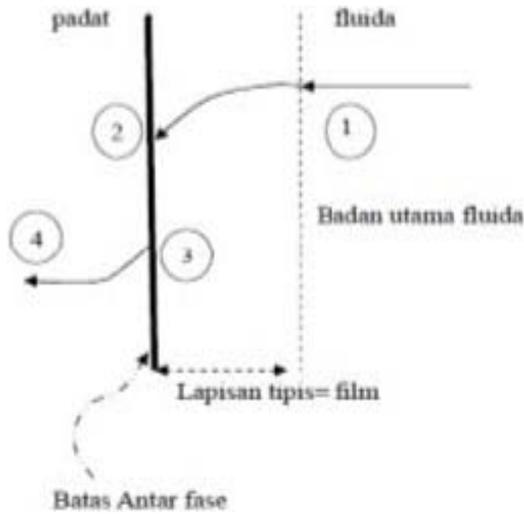
Hubungan kesetimbangan yaitu:

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:

1. Satu film, terjadi pada kontak fase padat dengan fluida  
Ditinjau difusi solut dari fluida ke padatan: arah transfer tergantung konsentrasi.  
Contoh kasus: pelarutan gula dengan pengadukan, penjerapan logam berat dengan arang.

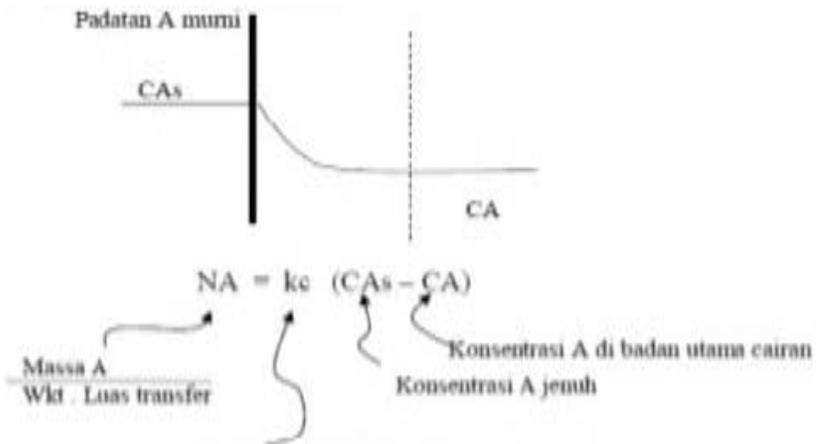
Ditinjau difusi solut dari fluida ke padatan:



Transfer massa yang terlibat:

1. Difusi A secara konvektif dari badan utama fluida ke permukaan padatan. Difusi ini terjadi di film, dari 1 ke 2.
2. Difusi A secara molekuler dari permukaan padatan ke dalam padatan, dari 3 ke 4.

Kecepatan perpindahan solut (A):



Koefisien transfer massa

Nilai 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

2. 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.

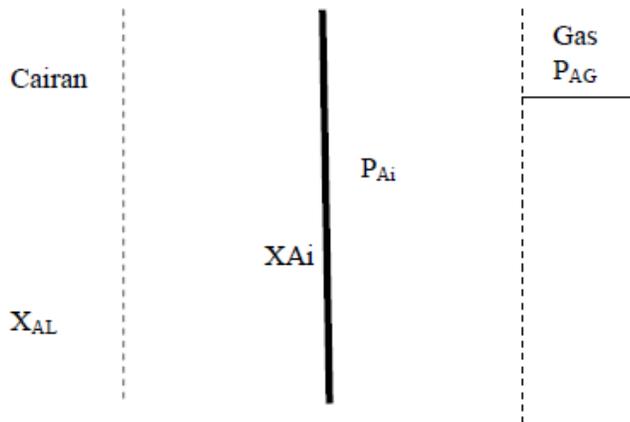
Efisiensi pada operasi destilasi, absorpsi atau ekstraksi merupakan fungsi dari laju perpindahan massa dan koefisien perpindahan.

Difusi antar fase dua film

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

3. Transfer Massa Antar Fase Dua Film

Ditinjau transfer massa solute (A) dari fluida I (gas) ke fluida II (cairan).



Gambar 8.  
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.

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

## Ringkasan Materi

1. Difusi molekuler merupakan transfer massa yang disebabkan gerakan molekuler secara acak dalam fluida diam, atau dalam fluida yang mengalir secara laminar.
2. Rumus untuk difusi molar berlawanan arah sebagai berikut:

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

3. *Equimolar counter diffusion* (difusi berlawanan arah)

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

## Latihan Soal

1. Metana berdifusi melalui helium yang tidak berdifusi. Gas metana berdifusi sepanjang pipa dengan panjang 0,1 m yang di dalamnya terdapat gas He pada temperatur 298 K dan tekanan total  $1,01325 \times 10^5$  Pa. Tekanan parsial  $\text{CH}_4$  pada kondisi awal dan akhir berturut-turut adalah  $1,4 \times 10^4$  Pa and  $1,333 \times 10^3$  Pa. Helium tidak terlarut dan tidak berdifusi. Difusivitas dapat dilihat pada tabel 6.2-1 (Geankoplis). Hitunglah fluks metana dalam  $\text{kmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  pada *steady state*.
2. Etanol berdifusi melalui stagnan film setebal 1 mm ke dalam air. Konsentrasi etanol masuk ( $C_{A1}$ ) sebesar  $0,1 \text{ mol}/\text{m}^3$  dan keluar ( $C_{A2}$ ) sebesar  $0,02 \text{ mol}/\text{m}^3$ . Jika temperatur air 283 K, tekanan 1 atm. Tentukan flux etanol dalam air!

## Difusi Melalui Non Stagnan Film

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Mahasiswa mampu menjelaskan dan menerapkan tentang difusi melalui non stagnan film.

1. Koefisien transfer massa
2. Satuan koefisien transfer massa
3. Difusi olakan
4. Analisis dimensional
5. Persamaan koefisien transfer

### A. Koefisien Transfer Massa Konvektif

Transfer massa terjadi jika perbedaan fugasitas, untuk cairan dapat didekati dengan konsentrasi, dan untuk gas didekati dengan tekanan.

$$k_C(C_{A1} - C_{A2}) = k_G(P_{A1} - P_{A2}) = k_y(y_{A1} - y_{A2})$$

$$y_{A1} = \frac{C_{A1}}{C}$$

$$k_C = \frac{k_y}{C}$$

$$C = \frac{P}{RT}$$

$$k_C = \frac{P}{RT} = k_y$$

Untuk cairan

$$N_A = k_C(C_{A1} - C_{A2}) = k_L(C_{A1} - C_{A2}) = k_x(X_{A1} - X_{A2})$$

$$X_{A1} = \frac{C_{A1}}{C}$$

$$k_C C = k_L C = k_x$$

### B. Teori Lapisan Film

- Pada lapisan laminer perpindahan massa sebagian besar terjadi secara difusi molekul dan beda konsentrasi terbesar terjadi di daerah ini, NERST (1904) mengungkapkan teori lapisan film.
- Fluks molar:

$$N_A = -CD_{AB} \frac{dx_A}{dz}$$

$$N_A = -CD_{AB} \frac{x_{A1} - x_{A2}}{\delta}$$

$$N_A = k_x(x_{A1} - x_{A2})$$

$$k_x = \frac{CD_{AB}}{\delta} = \text{koefisien film}$$

### C. Transfer Massa Dua Fase

Asumsi

- Kecepatan perpindahan massa yang mengontrol adalah kecepatan perpindahan massa difusi melalui lapisan film pada masing-masing fasa.
- Tidak ada tahanan pada permukaan antar fasa

Tahanan pada permukaan antar fasa tidak ada maka  $P_{Ai}$  dan  $C_{Ai}$  ada dalam kesetimbangan, dinyatakan  $P_{Ai} = H \cdot C_{Ai}$

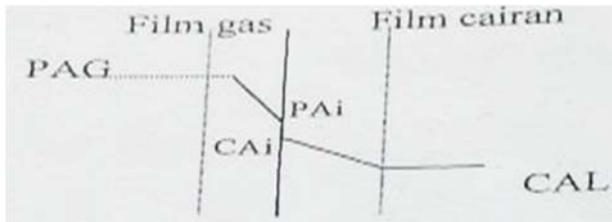
Koefisien perpindahan massa pada fase gas ( $k_G$ )

$$N_A = k_G(P_{AG} - P_{Ai})$$

$$\text{Di fasa cair } N_A = k_L(C_{Ai} - C_{AL})$$

Akumulasi A pada lapisan film diabaikan

$$N_A = k_L(C_{Ai} - C_{AL}) = k_G(P_{AG} - P_{Ai})$$



Gambar 9.  
Transfer Massa Dua Film

$$P_{AG} - P_{Ai} = \frac{N_A}{k_G}$$

$$C_{Ai} - C_{AL} = \frac{N_A}{k_L}$$

$$P_{AG} - P_{Ai} + HC_{Ai} - HC_{AL} = \frac{N_A}{k_G} + \frac{HN_A}{k_L}$$

$$P_{Ai} = HC_{Ai}$$

$$(P_{AG} - HC_{AL}) = N_A \left( \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L} \right)$$

$$N_A = \frac{P_{AG} - HC_{AL}}{\left(\frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L}\right)} = \frac{P_{AG} - P_A^*}{\frac{1}{k_G}} = k_G(P_{AG} - P_A^*)$$



Gambar 10.  
Ilustrasi Perpindahan Massa (a) Fasa Gas (b) Fasa Cair

$$\begin{aligned} \frac{P_{AL}}{H} - \frac{P_{Ai}}{H} &= \frac{N_A}{Hk_G} \\ C_{Ai} - C_{AL} &= \frac{N_A}{k_L} \\ \frac{P_{AL}}{H} - \frac{P_{Ai}}{H} + C_{Ai} - C_{AL} &= N_A \left( \frac{1}{Hk_G} + \frac{1}{k_L} \right) \\ \frac{P_{AG}}{H} - C_{AL} &= N_A \left( \frac{1}{Hk_G} + \frac{1}{k_L} \right) \\ N_A &= K_L(C_A^* - C_{AL}) \end{aligned}$$

$C_A^*$ : konsentrasi A di fasa cair yang ada dalam kesetimbangan dengan tekanan A di fasa gas.

Untuk suatu bahan yang mudah larut, misal: amonia dalam air  $H \ll$ , sehingga  $\frac{1}{k_G} \approx \frac{1}{k_L} \rightarrow$  tahanan fasa gas yang mengontrol

Bahan yang sukar larut, misal  $CO_2$  dalam air,  $H \gg$

$\frac{1}{k_L} \approx \frac{1}{k_G} \rightarrow$  tahanan fasa cair yang mengontrol

Pada kenyataannya dalam eksperimen yang terhitung adalah  $K_G$  atau  $K_L$ . Kemudian dengan sifat-sifat mudah larut  $H \ll$  yang mengon-

trol adalah perpindahan massa di fasa gas tahanan di fasa cair << sehingga diabaikan,  $K_G \approx k_G$

### Contoh Soal 3.1

Pada percobaan absorpsi  $\text{NH}_3$  oleh air di dalam kolom dinding basah, diperoleh  $K_G = 0,205 \text{ lbmolNH}_3/\text{j.ft}^2.\text{atm}$ . Pada suatu tempat tertentu di dalam kolom gas mengandung 10%  $\text{NH}_3$  dan di fase cair 0,005 mol  $\text{NH}_3/\text{j.ft}^3$ . Ternyata 95% tahanan total transfer massa ada di fasa gas. Suhu  $68^\circ\text{F}$ , 1 atm,  $H = 0,15 \text{ atm/mol NH}_3/\text{ft}^3$ . hitung koefisien transfer massa lapisan dan komposisi antar muka!

### Penyelesaian

Diketahui:  $\text{NH}_3 = A$ ;  $K_G = 0,205 \text{ lbmol NH}_3/\text{j ft}^2 \text{ atm}$ ;  $y_A = 0,1$ ;  $C_{AL} = 0,005 \text{ molNH}_3/\text{j ft}^3$ ;  $y_T = 0,95$ ;  $H = 0,15 \text{ atm}/(\text{molNH}_3/\text{ft}^3)$ ;  $T = 68^\circ\text{F} = 20^\circ\text{C} = 293\text{K}$ ;  $P = 1 \text{ atm}$

Ditanya:  $k_L$ ; komposisi antar muka ( $P_{Ai}$ ,  $C_{Ai}$ )?

Jawab:

- o Mencari  $k_L$

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L}$$

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{0,205 \text{ lbmol NH}_3/\text{j ft}^2 \text{ atm}} = 4,8780 \text{ j ft}^2 \text{ atm}/\text{lb. mol NH}_3$$

$$\frac{1}{K_G} = y_T \cdot \frac{1}{K_G} = 0,95 \cdot 4,8780 = 4,6341 \text{ ft}^2 \text{ j atm}/\text{lbmol NH}_3$$

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{4,6341 \text{ ft}^2 \text{ j atm}/\text{lbmol NH}_3} = 0,2158 \text{ lbmol NH}_3/\text{jft}^2 \text{ atm}$$

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L}$$

$$4,8780 = 4,6341 + \frac{0,15}{k_L}$$

$$\frac{1}{k_L} = \frac{0,2439 \text{ ft}^2 \text{ j. atm}/\text{lb. mol NH}_3}{0,15 \text{ atm}/(\text{lbmolNH}_3/\text{ft}^3)} = 1,626 (\text{lbmolNH}_3/\text{ft}^3) \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{j}/\text{lb. mol NH}_3$$

$$k_L = 0,6150 \text{ lbmolNH}_3/\text{j. ft}^2 \cdot (\text{molNH}_3/\text{ft}^3)$$

- o Mencari  $P_{Ai}$  dan  $C_{Ai}$

$$P_{A^*} = H.C_{AL} = 0,15 \text{ atm ft}^3/\text{molNH}_3 \cdot 0,005 \text{ molNH}_3/\text{j ft}^3 = 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ atm}$$

$N_A$  di fase gas:

$$P_{AG} = y_A \cdot P = 0,1 \cdot 1 \text{ atm} = 0,1 \text{ atm}$$

$$N_A = K_G \cdot (P_{AG} - P_{A^*}) = 0,205 \text{ lbmol NH}_3/\text{j ft}^2 \text{ atm} \cdot (0,1 - 7,5 \cdot 10^{-5}) \text{ atm}$$

$$N_A = 0,0205 \text{ lbmol NH}_3/\text{j ft}^2$$

$N_A$  di semua kondisi sama, interface, cair maupun gas

$N_A$  di fase interfase gas:

$$N_A = k_G \cdot (P_{AG} - P_{Ai})$$

$$0,0164 \text{ lbmol NH}_3/\text{j ft}^2 = 0,2158 \text{ lbmol NH}_3/\text{j ft}^2 \text{ atm} \cdot (0,1 - P_{Ai})$$

$$(0,1 \text{ atm} - P_{Ai}) = \frac{0,0205 \text{ lbmol NH}_3/\text{j ft}^2}{0,2158 \text{ lbmol NH}_3/\text{j ft}^2 \text{ atm}}$$

$$P_{Ai} = (0,1 - 0,0949) \text{ atm} = 0,0051 \text{ atm}$$

$$P_{Ai} = H \cdot C_{Ai}$$

$$0,0051 \text{ atm} = 0,15 \text{ atm ft}^3/\text{molNH}_3 \cdot C_{Ai}$$

$$C_{Ai} = \frac{0,0051}{0,15 \text{ atm ft}^3/\text{molNH}_3} = 0,034 \text{ molNH}_3/\text{ft}^3$$

### Contoh Soal 3.2

Aliran air limbah mengalir dari atas menara, alirannya *counter current* dengan aliran udara. Konsentrasi air limbah  $A$   $10^{-3} \text{ gmolA/m}^3$  udara bebas  $A$ . Koefisien transfer massa film  $k_L = 5 \cdot 10^{-4} \text{ kgmol/m}^2 \cdot \text{s}$  ( $\text{kgmol/m}^3$ ) dan  $k_G = 0,01 \text{ kgmol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}$ . Konstanta Henry ( $H$ ) =  $10 \text{ atm}/(\text{kgmol/m}^3)$ . Tentukan:

- Flux masa overall  $A$  ( $N_A$ )
- Koefisien massa overall di fase cair ( $K_L$ ) dan di fase gas ( $K_G$ )

Diketahui:

$$C_{AL} = 10^{-3} \text{ gmolA/m}^3;$$

$$P_{AG} = 0;$$

$$k_L = 5 \cdot 10^{-4} \text{ kgmol/m}^2 \cdot \text{s} (\text{kgmol/m}^3);$$

$$k_G = 0,01 \text{ kgmol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}$$

$$H = 10 \text{ atm}/(\text{kgmol}/\text{m}^3)$$

Ditanya:

- $N_A$
- $K_L$  dan  $K_G$

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{Hk_G} + \frac{1}{k_L} = \frac{1}{\left(10 \frac{\text{atm}}{\text{kgmol}/\text{m}^3}\right) \left(0,01 \frac{\text{kgmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}}\right)} + \frac{1}{5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kgmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kgmol}/\text{m}^3}}$$

$$K_L = 4,97 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kgmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kgmol}/\text{m}^3}$$

Mencari konsentrasi

$$C_A^* = \frac{P_{AG}}{H} = \frac{0 \text{ atm}}{10 \frac{\text{atm}}{\text{kgmol}/\text{m}^3}} = 0 \text{ kgmol}/\text{m}^3$$

$$p_A^* = H \cdot C_{AL} = \left(10 \frac{\text{atm}}{\text{kgmol}/\text{m}^3}\right) \left(\frac{10^{-6} \text{kgmol}}{\text{m}^3}\right) = 10^{-5} \text{atm}$$

Fluks A pada operasi stripping adalah:

$$N_A = K_L(C_{AL} - C_A^*) = \left(4,97 \cdot \frac{10^{-10} \text{m}}{\text{s}}\right) \left(\frac{10^{-6} \text{kgmol}}{\text{m}^3}\right)$$

$$= 4,97 \cdot 10^{-10} \text{kgmol}/\text{m}^3 \text{s}$$

Menghitung koefisien transfer massa overall ( $K_G$ )

$$K_G = \frac{N_A}{P_A^* - P_{AG}} = \frac{4,97 \cdot 10^{-10} \frac{\text{kgmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}}{10^{-5} \text{atm} - 0} = 4,97 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kgmol}}{\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}}$$

#### D. Difusi Olakan

Pada difusi molekuler, baik yang berlangsung dalam media diam maupun dalam media yang bergerak laminar, maka kecepatan difusi dinyatakan dengan Hukum Fick, tetapi pada kenyataannya, yang lebih banyak ditemui adalah keadaan Turbulen, sehingga kecepatan perpindahan massa menjadi lebih tinggi. Teori untuk keadaan turbulen ini masih belum bisa diformulasi secara jelas dan lebih banyak digunakan korelasi empiris

dari data eksperimen atau menggunakan analogi transfer momentum atau transfer panas.

Perpindahan massa turbulen dapat dituliskan dalam bentuk perpindahan massa secara difusi,  $C$  tetap.

$$J_{AZ} = -(D_{AB} + \epsilon_m) \frac{dC_A}{dt}$$

$\epsilon_m$ : difusi olakan

- o Untuk daerah laminer  $\epsilon_m \sim 0$  yang dominan adalah difusi molekuler
- o Untuk daerah transisi  $D_{AB}$  sebanding dengan  $\epsilon_m$
- o Untuk di daerah turbulen  $\epsilon_m \gg D_{AB}$  sehingga  $D_{AB}$  diabaikan

$\epsilon_m$  bervariasi dengan posisi, jika dipakai  $\epsilon_m$  difusivitas olakan rata-rata

$$J_{AZ} = (\epsilon_m + D_{AB}) \frac{C_{A1} - C_{A2}}{Z_2 - Z_1}$$

$J_{AZ}$  berdasar luas permukaan  $A_1$ ,  $Z_2 - Z_1$  juga tidak diketahui sehingga lebih mudah ditulis:

$$J_{AZ} = k_G(C_{A1} - C_{A2})$$

$k_G$ : koefisien perpindahan massa

### E. Koefisien Perpindahan Massa Volumetrik

Untuk kasus pada luas bidang yang sulit ditentukan, misal gelombang-gelombang gas, butir-butir yang tidak seragam, maka lebih mudah dinyatakan dalam koefisien perpindahan massa volumetrik.

$$W_A = k_x \cdot aV(x_{A1} - x_{A2})$$

$W_A$  : kecepatan perpindahan massa (mol/ detik)

$k_x \cdot a$  : koefisien perpindahan massa volumetrik (1/detik, 1/satuan waktu)

$v$  : volume cairan dan volume gelembung gas

Sedang perpindahan massa pada tumpukan bahan isian (*packing*)

$$W_A = k_L \cdot aV(x_{A1} - x_{A2})$$

$v$ : volume tumpukan bahan isian

## F. Analisis Dimensional

Analisis dimensi ialah suatu metode untuk mengurangi jumlah kerumitan variabel eksperimental yang memengaruhi gejala fisika tertentu, dengan menggunakan semacam teknik peringkasan. Ada dua macam dimensi, yaitu Dimensi Primer dan Dimensi Sekunder. Dimensi Primer meliputi; M (untuk satuan massa), L (untuk satuan panjang) dan T (untuk satuan waktu). Dimensi Sekunder adalah dimensi dari semua Besaran Turunan yang dinyatakan dalam Dimensi Primer. Contoh: Dimensi gaya:  $M L T^{-2}$  dan Dimensi percepatan:  $L T^{-2}$

Satuan dan dimensi suatu variabel adalah dua hal berbeda. Satuan besaran fisis didefinisikan dengan perjanjian yang berhubungan dengan standar tertentu (contohnya, besaran panjang dapat memiliki satuan meter, kaki, inci, mil atau mikrometer), tetapi Dimensi besaran panjang hanya satu, yaitu L. Dua satuan yang berbeda dapat dikonversikan satu sama lain (contohnya:  $1 \text{ m} = 39,37 \text{ in}$ ; angka 39,37 ini disebut sebagai faktor konversi), sementara tidak ada faktor konversi antar lambang dimensi.

Keuntungan menggunakan analisis dimensi

- penghematan waktu dan biaya.
- cara ini membantu mengarahkan pemikiran dan perencanaan kita, baik mengenai percobaan maupun secara teoritis
- analisis dimensi memberikan data dari model kecil yang murah ke informasi rancang bangun untuk membuat prototype yang besar dan mahal
- Dapat digunakan untuk membuktikan dua besaran sama atau tidak. Dua besaran sama jika keduanya memiliki dimensi yang sama atau keduanya termasuk besaran vektor atau skalar.
- Mengungkapkan kesetaraan atau kesamaan dua besaran yang se-pintas berbeda, misalnya antara energi dan usaha. Pada energi diambil rumus kinetik:  $\frac{1}{2} mv^2$ . Dimensi massa (m) adalah [M], dimensi kecepatan (v) yaitu [L][T]<sup>-1</sup>, sedangkan  $\frac{1}{2}$  adalah konstanta yang tidak berdimensi. Jadi dimensi energi:

$$[E] = [M]([L][T]^{-1})^2 = [M][L]^2[T]^{-2}$$

- Dapat digunakan untuk menentukan persamaan yang pasti salah atau mungkin benar,

Sering kali kita dapat menentukan bahwa suatu rumus salah hanya dengan melihat dimensi atau satuan dari kedua ruas persamaan. Sebagai contoh, ketika kita menggunakan rumus  $A = 2\pi r$  untuk menghitung luas. Dengan melihat dimensi kedua ruas persamaan, yaitu  $[A] = L^2$  dan  $[2\pi r] = L$

Kita dengan cepat dapat menyatakan bahwa rumus tersebut salah karena dimensi kedua ruasnya tidak sama. Akan tetapi, perlu diingat jika kedua ruas memiliki dimensi yang sama, itu tidak berarti bahwa rumus tersebut benar. Hal ini disebabkan pada rumus tersebut kemungkinan terdapat suatu angka atau konstanta yang tidak memiliki dimensi, misalnya  $E_k = 1/2 mv^2$ , di mana  $1/2$  tidak bisa diperoleh dari analisis dimensi.

Kita harus ingat karena dalam suatu persamaan ada kemungkinan muncul angka tanpa dimensi, maka angka tersebut diwakili dengan suatu konstanta tanpa dimensi, misalnya konstanta  $k$ . Dapat digunakan untuk menurunkan persamaan suatu besaran fisis jika kesebandingan besaran fisis tersebut dengan besaran-besaran fisis lainnya diketahui.

Jika kita melakukan suatu eksperimen untuk meneliti suatu kejadian fisika, kita pasti menemukan faktor-faktor yang berpengaruh pada kejadian fisika tersebut sehingga kejadian fisika tersebut dapat terjadi. Setelah semua faktor telah dianalisis, tugas selanjutnya adalah kita harus membuat persamaan fisika dari kejadian tersebut agar kejadian tersebut dapat dihitung dengan angka, sehingga kita dapat menafsirkan hal yang akan terjadi jika faktor-faktornya diubah.

Lebih lengkap dapat dibaca dari Tabel 6.1 Frank Kreith halaman 319 mengenai beberapa besaran fisik dengan simbol, dimensi dan satuan yang bersangkutan.

Bagaimana rumus dimensi  $D_{AB}$ ?

$$\text{Dimensi } D_{AB} = \frac{-J_{AZ}}{\frac{dCA}{dz}} = \left(\frac{M}{L^2T}\right) \left(\frac{L}{M/L^2}\right) = \frac{L^2}{T} \text{ cm}^2/\text{detik atau ft}^3/\text{jam}$$

Koefisien difusi merupakan sifat spesifik sistem yang tergantung pada suhu, tekanan dan komposisi. Analisa dimensi banyak diaplikasikan dalam membangun sebuah model dibidang mekanika fluida.

Model analisa ini akan membuat para desainer/para peneliti mendapatkan informasi yang mendekati kebenaran sebelum memulai melaksanakan pekerjaan yang sesungguhnya, dan untuk mendapatkan pengaruh yang akan ditimbulkannya.

Model desain ini sering digunakan pada umumnya untuk kegiatan-kegiatan sebagai berikut:

- Perencanaan bendungan
- Perencanaan sungai dan pelabuhan
- Perencanaan mesin hidrolik
- Perencanaan struktur
- Perencanaan kapal
- Perencanaan rembesan air dalam tanah

Untuk mendapatkan jumlah variabel dari suatu persamaan dapat ditentukan dengan metode:

- Buckingham (Phi-Theorema)
- Rayleigh
- Basic Echelon
- Stepwise
- Langhaar

### Contoh 3.3

Asumsikan bahwa gaya viskositas dari sebuah benda bulat yang masuk kedalam fluida berdiameter  $D$ , bergantung pada viskositas ( $\mu$ ), kerapatan massa fluida ( $\rho$ ), dan kecepatan jatuh bola ( $v$ ), buktikanlah  $F$  tergantung pada  $D$ ,  $v$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ !

**Penyelesaian:**

$$F = \varphi (D, v, \rho, \mu) ;$$

Variabelnya ada (F, D, v, ρ, μ) = 5 buah. Satuan dasarnya L M T = 3 buah.

Jadi jumlah konstanta tak berdimensi = 5 - 3 = 2.

Pilihan variabel berulang adalah D, v, dan ρ.

$$\pi_1 = D^{a_1} \cdot v^{b_1} \cdot \rho^{c_1} \cdot F$$

$$\pi_2 = D^{a_2} \cdot v^{b_2} \cdot \rho^{c_2} \cdot \mu$$

$$F = \Phi(D, v, \rho, \mu)$$

Analisa  $\pi_1$

$$L^0 M^0 T^0 = [L]^{a_1} [LT^{-1}]^{b_1} [ML^{-3}]^{c_1} [MLT^{-2}]$$

$$\text{Untuk satuan L : } 0 = a_1 + b_1 - 3c_1 + 1$$

$$\text{Untuk satuan M: } 0 = c_1 + 1 \text{ jadi } c_1 = -1$$

$$\text{Untuk satuan T : } 0 = -b_1 - 2 \text{ jadi } b_1 = -2 \text{ dan harga } a_1 = -2$$

$$\pi_1 = F(D^{-2} v^{-2} \rho^{-1}) \text{ atau } \pi_1 = F/(D^2 \cdot v^2 \cdot \rho).$$

Analisa  $\pi_2$

$$L^0 M^0 T^0 = [L]^{a_2} [LT^{-1}]^{b_2} [ML^{-3}]^{c_2} [ML^{-1}T^{-1}]$$

$$\text{Untuk satuan L : } 0 = a_2 + b_2 - 3c_2 - 1$$

$$\text{Untuk satuan M: } 0 = c_2 + 1 \text{ jadi } c_2 = -1$$

$$\text{Untuk satuan T : } 0 = -b_2 - 1 \text{ jadi } b_2 = -1 \text{ dan harga } a_2 = -1$$

$$\pi_2 = \mu(D^{-1} v^{-1} \rho^{-1}) \text{ atau } \pi_2 = \mu/(D \cdot v \cdot \rho)$$

$$\pi_1 = f(\pi_2)$$

$$F/(D^2 v^2 \rho) = f(\mu/Dv\rho)$$

$F = (D^2 \cdot v^2 \cdot \rho) \Phi(Dv\rho/\mu)$  jika dibalik fungsi f, maka didapat persamaan

$F = (D^2 \cdot v^2 \cdot \rho) \Phi(Re)$  tanda  $\Phi$  adalah transformasi

**Metode Rayleigh**

Jika suatu debit saling perhubungan satu dengan lainnya dari  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  dan seterusnya, maka hubungan diekpresikan menjadi

$$Q_1 = K Q_2^a Q_3^b Q_4^d$$

K disebut sebagai parameter tak berdimensi

### Contoh Soal 3.4.

Suatu pendulum mempunyai periode  $t$ , panjangnya adalah  $l$  dan percepatan gravitasi  $g$ , maka persamaannya adalah

$T = K.l.a.gb$  satuannya adalah sesuai dengan LMT adalah  $T = L^a.L^b.T^{-2b}$

Sehingga untuk harga L:  $0 = a+b$  untuk harga T:  $1 = -2b$  jadi  $b = -1/2$  dan  $a = 1/2$

Sehingga nilai  $t = K.l.a.gb$  menjadi  $t = K.l(1/2).g(1/2)$

$$t = K \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Baca dan pelajari secara mandiri mengenai materi metode Basic Eche- lon, Stepwise, dan Langhaar. Untuk menentukan analisis dimensi, yang perlu diperhatikan adalah prinsip homogenitas dimensi yang digunakan dalam membentuk bilangan yang tidak berdimensi. Beberapa metode dapat digunakan dalam analisa dimensi, tetapi metode Buckingham yang paling banyak digunakan karena memiliki kestabilan dalam pembangunan model.

### Ringkasan Materi

1. Rumus transfer massa dua fase:  $N_A = k_L(C_{Ai} - C_{AL}) = k_G(P_{AG} - P_{Ai})$
2. Rumus fluks molar lapisan film:

$$N_A = k_x(x_{A1} - x_{A2})$$

$$k_x = \frac{CD_{AB}}{\delta} = \text{koefisien film}$$

3. Perpindahan massa turbulen dapat dituliskan dalam bentuk perpindahan massa secara difusi,  $C$  tetap, disebut difusi olakan.

$$J_{AZ} = -(D_{AB} + \epsilon_m) \frac{dC_A}{dt}$$

4. Koefisien perpindahan massa volumetrik.

$$W_A = k_x \cdot aV(x_{A1} - x_{A2})$$

5. Analisis dimensional adalah suatu metode untuk mengurangi jumlah kerumitan variabel eksperimental yang memengaruhi gejala fisika tertentu, dengan menggunakan semacam teknik peringkasan.

### Latihan Soal

1. Absorpsi komponen A dari aliran udara ke aliran cairan, komposisi yang teranalisis  $C_{AL} = 4 \text{ kgmol/m}^3$ ,  $P_{AG} = 1,013 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ , Konstanta Henry  $1,674 \cdot 10^3 \text{ Pa}/(\text{kgmol/m}^3)$ ,  $K_L = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ kgmol/m}^2 \cdot \text{s} (\text{kgmol/m}^3)$ ; jika 53% dari total tahanan di fase cair, tentukan:
  - a.  $k_L$
  - b.  $k_G$
  - c.  $C_{Ai}$
  - d.  $N_A$
2. Klorinasi air untuk proses *bleaching* pulp dipersiapkan dengan absorpsi gas klorin ( $\text{Cl}_2$ ) dalam air menggunakan menara isian dengan suhu operasi 293 K dan tekanan  $1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$ . Pada suatu titik tertentu tekanan parsial gas  $\text{Cl}_2$  ( $p_{AG}$ )  $2 \times 10^4$ , dan konsentrasi  $\text{Cl}_2$  di fase cair sebesar (**sesuai 1 digit NIM terakhir**)  $\text{kgmol/m}^3$ . Konstanta Henry (H) sebesar  $669.275 \text{ Pa}/(\text{kgmol/m}^3)$ . Jika 75% resisten ada di fase cair. Tentukan konsentrasi  $\text{Cl}_2$  di interfase cair ( $C_{Ai}$ )!

3. Sejumlah gas murni B ( $V_B \gg V_A$ ) mempunyai tekanan total 1 atm, mengalir di atas permukaan cairan A murni yang menguap. Cairan A membasahi permukaan kertas. Jika, tekanan uap A pada suhu 303 K sebesar 0,1 atm,  $k'_y$  sebesar  $6,78 \times 10^{-5}$  kgmol/s m<sup>2</sup> mol frac. Hitunglah koefisien transfer massa ( $k_G$ ) satuan kgmol/s m<sup>2</sup> atm!



## Transfer Massa Antar Fase

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Mahasiswa dapat menjelaskan dan menerapkan transfer massa antar fase

1. Kesetimbangan
2. Koefisien transfer massa lokal
3. Koefisien transfer massa keseluruhan
4. Alat-alat transfer massa
5. Koefisien kapasitas transfer massa
6. Menjelaskan analisis alat kontak kontinu

## A. Keseimbangan

Perpindahan massa baik secara molekular maupun secara konveksi sangat tergantung dari gradien konsentrasi. Ketika keseimbangan tercapai, maka kecepatan perpindahan massa = 0, perpindahan massa antar fasa pun memerlukan gaya pendorong yang berupa beda fugasitas, karena deviasi terhadap keadaan setimbang merupakan driving force untuk terjadinya transfer massa maka perlu didefinisikan keseimbangan antar fasa.

Keseimbangan interface

$$P_{Ai} = H \cdot C_{Ai}$$

Jika sudah dicapai keadaan ini maka keseimbangan dinamis dapat dicapai.

### Contoh soal 4.1.

Udara dan uap amonia dikontakkan dengan air murni, setelah waktu tertentu dicapai keseimbangan dinamis, ini ditandai dengan konsentrasi amoniak di dalam air maupun tekanan parsial amoniak di udara sudah konstan.

Tekanan uap cairan dinyatakan dengan Hukum Roulst:

$$P_{Ai} = x_A \cdot P_{AS}$$

$P_{Ai}$  : tekanan parsial uap A

$P_{AS}$  : tekanan uap jenuh pada suhu yang sama

$x_A$  : fraksi mol A di fasa cair

Untuk gas ideal berlaku Hukum Dalton

$$P_{Ai} = y_A \cdot P$$

$P_{Ai}$  : tekanan parsial uap A

$y_A$  : fraksi mol A di fasa gas

$P$  : tekanan total sistem

Sehingga jika dianggap ideal maka:

$$x_A \cdot P_{AS} = y_A \cdot P$$

Untuk larutan yang sangat encer berlaku persamaan Henry:

$$P_{Ai} = H \cdot C_{Ai}$$

H: konstanta Henry

Untuk dua cairan yang tidak saling larut:

$$C_{A1} = K C_{A2}$$

K: konstanta kesetimbangan

### Contoh soal 4.2

Konstanta Henry untuk oksigen dalam air pada  $20^\circ\text{C} = 4,01 \times 10^4 \text{ atm}/(\text{mol fraksi})$ . Cari konsentrasi jenuh  $\text{O}_2$  dalam air yang berkontak dengan udara kering pada tekanan 1 atm,  $20^\circ\text{C}$ .

Komposisi udara kering  $\text{O}_2 : \text{N}_2 = 0,21 : 0,79$

$$P_{\text{O}_2} = 0,21 \text{ atm}$$

$$P_{\text{O}_2} = H \cdot X_{\text{O}_2}$$

$$\begin{aligned} X_{\text{O}_2} &= \frac{0,21 \text{ atm}}{4,01 \cdot \frac{10^4 \text{ atm}}{\text{mol fraksi}}} = 5,237 \cdot \frac{10^{-6} \text{ mol O}_2}{\text{mol}} \text{ air} \\ &= 9,31 \cdot 10^{-6} \text{ g} \cdot \frac{\text{O}_2}{\text{g}} \cdot \text{air} = 9,31 \text{ mg/l} = 9,31 \text{ ppm} \end{aligned}$$

jika air dikontakkan dengan oksigen murni pada tekanan dan suhu yang sama,

$$P_{\text{O}_2} = 1 \text{ atm}$$

$$P_{\text{O}_2} = H \cdot X_{\text{O}_2}$$

$$\begin{aligned} X_{\text{O}_2} &= \frac{1 \text{ atm}}{4,01 \cdot \frac{10^4 \text{ atm}}{\text{mol fraksi}}} = 2,5 \cdot \frac{10^{-5} \text{ mol O}_2}{\text{mol}} \text{ air} \\ &= 44,3 \cdot 10^{-6} \text{ g} \cdot \frac{\text{O}_2}{\text{g}} \cdot \text{air} = 44,3 \text{ mg/l} = 44,3 \text{ ppm} \end{aligned}$$

### Contoh soal 4.3

Etil alkohol ditempatkan dalam sebuah gelas piala yang mempunyai diameter 4 inci, tinggi permukaan alkohol dalam gelas piala adalah 4 inci, gelas diletakkan dalam ruangan dengan suhu 90°F. Diperkirakan di atas alkohol ada lapisan udara diam setebal 1 inci. Tekanan udara 1 atm. Berapa waktu yang diperlukan untuk menguapkan alkohol sampai habis?

Difusivitas alkohol-udara pada 0°C = 0,012 cm<sup>2</sup>/det

P alkohol 90°F = 92 mmHg

ρ alkohol 90°F = 0,775 g/cm<sup>3</sup>

T mula-mula = 32°F

Jawab:

Transfer massa karena difusi melalui media yang diam

$$N_{AZ} = -C \cdot D_{AB} \frac{dX_A}{dz} + X_A(N_{AZ} + N_{BZ})$$

$$N_{AZ} = -\frac{C \cdot D_{AB}}{(1 - X_A)} \frac{dX_A}{dz}$$

$$N_{AZ}|_{z=z_1} = \frac{C \cdot D_{AB}}{Z_2 - Z_1} \frac{X_{A1} - X_{A2}}{X_{Bmean}}$$

Hukum Gas Ideal:  $C = \frac{n}{v} = \frac{P}{RT}$

$$N_{AZ}|_{z=z_1} = \frac{D_{AB}\rho}{RT(Z_2 - Z_1)} \frac{P_{A1} - P_{A2}}{\ln \frac{P_{B1}}{P_{B2}}}$$

$$P_{Bmean} = \frac{P_{B2} - P_{B1}}{\ln \frac{P_{B1}}{P_{B2}}}$$

$$D_{AB}(90^\circ\text{F}, 1 \text{ atm}) = D_{AB}0^\circ\text{F} \left(\frac{P_1}{P_2}\right) \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{3/2}$$

$$D_{AB}(90^\circ\text{F}, 1 \text{ atm}) = 0,012 \left(\frac{1}{1}\right) \left(\frac{90 + 460}{32 + 460}\right)^{3/2} = 0,01418 \text{ cm}^2/\text{s}$$

P<sub>A1</sub>: tekanan uap jenuh alkohol pada 90°F = 92/760 = 0,121 atm

P<sub>A2</sub>: 0 dibawa aliran udara

$$P_{B2}: 1 \text{ atm}, P_{B1} = 1 - 0,121 \text{ atm} = 0,879 \text{ atm}$$

$$N_{AZ}|_{z=z_1} = \frac{0,01418 \text{ cm}^3 \text{ atm}}{0,08206 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{gmol} \cdot \text{K}} \cdot 305,2 \text{ K} \cdot 2,54 \text{ cm} \cdot \frac{1000 \text{ cm}^3}{\text{l}}} \frac{0,121}{(1 - 0,879)} \ln \frac{1}{0,897}$$

$$= \frac{2,87 \cdot 10^{-8} \text{ gmol}}{\text{cm}^2} \cdot \text{det} = 1,3225 \cdot \frac{10^{-6} \text{ g}}{\text{cm}^2} \cdot \text{det}$$

$$\text{Berat total alkohol: } V \cdot \rho = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot t \cdot 0,775 = \frac{\pi}{4} (2,54 \cdot 4)^3 \cdot 0,775 = 638,37 \text{ g}$$

$$\text{Luas: } \frac{\pi}{4} D^2 = 81,073 \text{ cm}^2$$

$$\text{Kecepatan penguapan: } N_{AZ}|_{z=z_1} \cdot \text{Luas} = 1,0772 \cdot 10^{-4} \text{ g/det}$$

Waktu penguapan:

$$\frac{638,37}{1,0772 \cdot 10^{-4} \text{ g/det}} = 5953871,98 = 1653,8 \text{ jam} = 68,91 \text{ hari}$$

## Latihan

Larutan acetaldehid 50% mol

$$D = 5 \text{ cm}$$

$$T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\delta = 1 \text{ cm}$$

$$DAB \text{ } 5 \text{ }^\circ\text{C} = 0,01 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

$$P_{\text{uap}} = 400 \text{ mmHg}$$

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

$$\rho_{\text{larutan}} = 0,9 \text{ g/cm}^3$$

Berapa waktu yang digunakan menguapkan acetaldehid?

## B. Alat Transfer Massa

Perancangan alat transfer massa

$$W_A = \frac{\text{jumlah A yang ditransfer}}{\text{waktu}} = \frac{\text{mol}}{\text{waktu}}$$

$$W_A = N_A \cdot A$$

$$N_A: \text{Fuks molar atau massa} = \frac{\text{mol}}{\text{waktu} \cdot \text{satuan luas}}$$

Dengan  $N_A$  diketahui,  $A$  dapat dicari

$$A = \frac{W_A}{N_A}$$

$N_A$  harus dicari terlebih dahulu

$N_A$  tergantung mekanisme perpindahan massa:

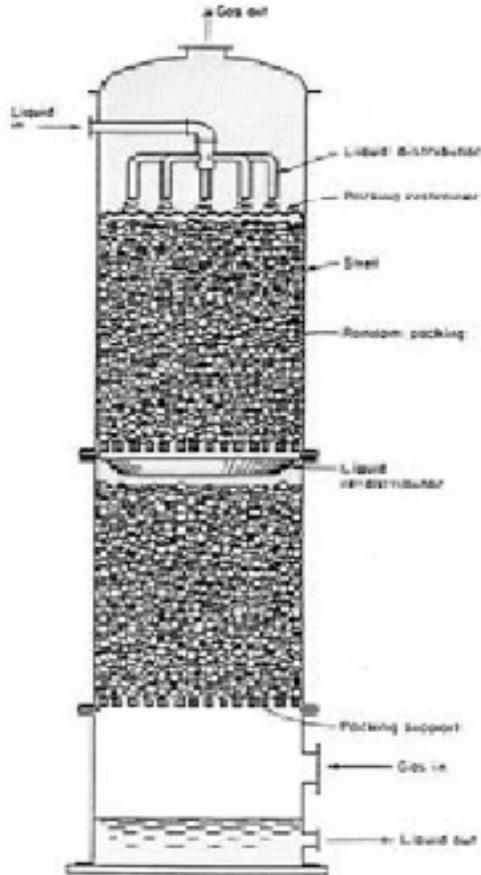
1. Difusi  $N_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz}$
2. Konveksi  $N_A = K_c (C_{Ai} - C_{Ab})$

Macam Alat Transfer Massa:

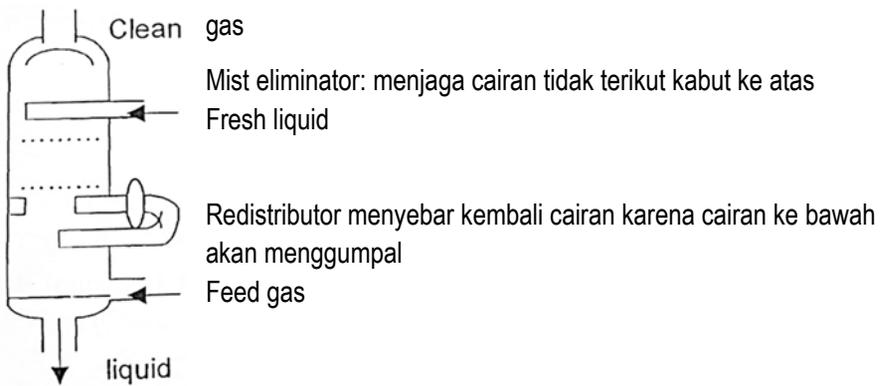
1. Menara Sembur (*spray tower*)

Menara sembur (*spray tower*) adalah perangkat *control* yang digunakan untuk pengkondisian gas (pendinginan atau pelembap) atau untuk partikel tahap pertama atau penghilang gas. *Spray tower* juga digunakan dalam banyak sistem desulfurisasi gas buang untuk mengurangi penyumbatan dan penumpukan kerak oleh poutan.

*Spray tower* telah digunakan secara efektif untuk menghilangkan partikel besar dan gas yang sangat larut. Penurunan tekanan melintasi menara sangat rendah biasanya kurang dari 2,5 cm (0,1 in) air; dengan demikian biaya operasi scrubber relatif rendah. *spray tower* dibangun dalam berbagai ukuran yang kecil untuk menangani aliran gas kecil 0,05 m<sup>3</sup>/s (106.000 m<sup>3</sup>/min) atau lebih besar. Karena kecepatan gas rendah dibutuhkan, unit yang menangani laju aliran gas besar cenderung berukuran besar. Ilustrasi *spray tower* dan komponen di dalamnya dapat dilihat pada gambar 11 dan 12.



Gambar 11.  
Menara Sembur



Gambar 12.  
Bagian dari Menara Sembur

Digunakan untuk:

- Gas yang diserap dan atau gas terlarutnya (larutan) korosif
- Gas mengandung debu/partikel-partikel kecil yang akan menyumbat jika digunakan menara bahan isian.
- Hanya satu/maksimum 2 stage teoritis yang diperlukan
- Pressure drop kecil
- Untuk gas yang mudah larut

Kelemahan:

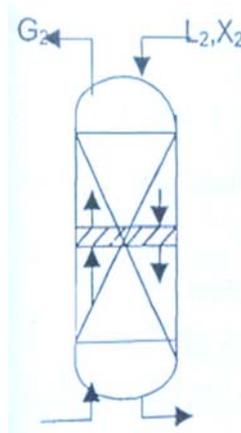
- Energi untuk membuat semburan cairan harus ada penangkap kabut (*mist eliminator*) dan menara cukup tinggi.

## 2. Menara Bahan Isian (*Packed Tower*)

Packed tower adalah sebuah kolom yang dilengkapi *packing* untuk memperluas bidang kontak dan membuat turbulensi sehingga kontak lebih sempurna. Packed tower dapat digunakan sebagai kolom fraksinasi untuk distilasi kontinu atau batch. Ukuran packing 3/2 atau 2 inci umumnya memberikan kapasitas yang sama dengan sieve tray. Packed umumnya berkisar 1 sampai 2 feet. Packing yang lebih kecil mempunyai kapasitas lebih rendah dan hal ini tidak mungkin digunakan dalam kolom yang besar. Umumnya pressure drop per equivalent theoretical plate lebih kecil dari pada sieve tray atau bubble cap tray, hal ini menguntungkan untuk operasi pada keadaan vakum.

Untuk packed tower, dikenal suatu istilah HETP, yaitu tinggi packed tower yang menghasilkan perubahan komposisi yang sama dengan perubahan komposisi yang dihasilkan oleh dua plate yang berurutan (jarak antar plate yang sama). Pemilihan bahan packing antara Keramik yang digunakan untuk liquid yang bersifat korosif ada juga Plastik yang cocok untuk temperatur sedang dan tidak cocok untuk pelarut organik dan juga Logam yang berlaku untuk kondisi operasi yang tidak stabil.

Prinsip kerjanya adalah zat yang berbeda fase mengalir berlawanan arah sehingga menyebabkan komponen kimia ditransfer dari satu fase ke fase lain. Zat berfase cair mengalir dari atas dan gas dari bawah, sehingga terjadi kontak antara keduanya. Gas yang berasal dari cerobong asap diisap dengan laju alir tertentu, kemudian gas tersebut dialirkan ke packed tower melalui bawah menara, cairan dimasukkan dari atas menara dan mengalir ke bawah menara secara gravitasi. Pengkontaminan akan larut di dalam cairan, udara bersih akan dilepaskan ke atmosfer melalui puncak menara. Gambar menara isian (packed tower) dapat dilihat pada gambar 13.

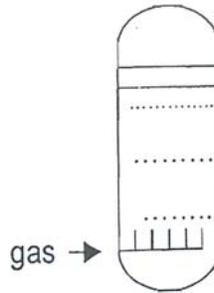


Gambar 13.  
Menara Bahan Isian

Keuntungan menggunakan menara bahan isian sebagai berikut:

- Fabrikasi sederhana, hanya perlu penyangga packing dan distributor cairan  $\diamond$  tiap 10 ft
- Fleksibel, packing dapat diganti dengan mudah, jika ada perubahan: kapasitas, atau perubahan spesifikasi umpan atau hasil
- Dapat digunakan untuk fluida korosif misal digunakan bahan keramik
- Pressure drop kecil
- Harga relatif murah *packing plastic*

### 3. Menara Gelembung (*Bubble Tower*)



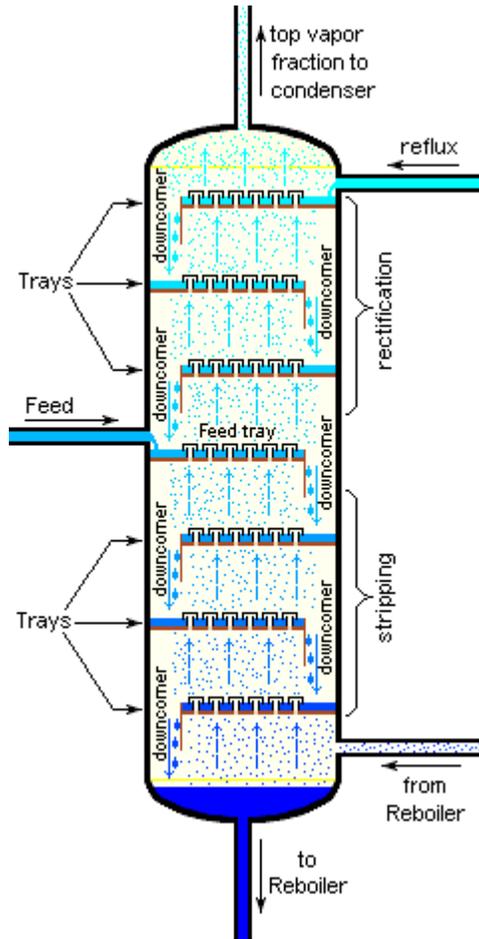
Gambar 14.  
Menara Gelembung

Alasan pemilihan menara gelembung:

- Untuk gas yang relatif sukar larut
- Fluida saling berkontak secara kontinu sepanjang menara.
- Komposisi gas dan cairan berubah sepanjang menara.
- Bahan A terdapat dalam gas akan diserap dengan cairan solven, sehingga A akan terlarut dalam solven sedang gas lainnya tidak terlarut.

### 4. Menara Pelat (*Tray Tower*)

Menara pelat (*tray tower*) memiliki bentuk yang sama dengan packed column tapi tidak mempunyai packing, sebagai gantinya ada plate-plate yang berfungsi memperbesar kontak antar komponen sehingga bisa dipisahkan menurut rapat jenisnya. Jumlah tahapan plate disusun berdasarkan tingginya kesulitan pemisahan zat yg akan dipisahkan, dan perhitungan neraca massa dan kesetimbangan. Dipilih jenis ini karena bisa menangani laju alir liquid dan gas yang besar, pembersihan mudah karena bisa dipasang *manhole*, lebih mudah untuk pengambilan produk melalui samping, desain plate lebih terjamin efisiensi kerjanya. Menara yang di dalamnya terdapat *tray* (pelat), misal *sieve tray*, *bubble cap tray*, *valve tray*, dan lain-lain.

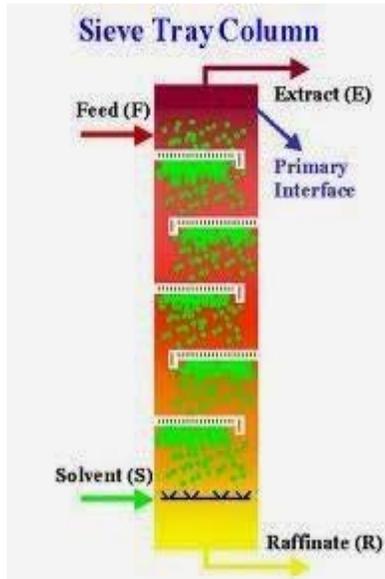


Gambar 15.  
Plate Tower

Salah satu jenis plate tower yang sering digunakan adalah *sieve tray*.

Pemilihan sieve tray didasarkan pada:

- Kapasitas tinggi
- Efisiensi tinggi
- Pressure drop* sedang
- Biaya instalasi dan perawatan murah
- Korosi rendah.



Gambar 16.  
Sieve Tray

Berdasarkan cara kontak maka alat transfer massa dapat dibagi menjadi:

- Kontak kontinu (*continous contact*): menara gelembung, menara sembur, menara packing
- Kontak bertingkat (*stage wise contact*): menara pelat, menara tray
- Kontak kontinu menara bahan isian, menara sembur, menara gelembung berbeda dengan menara pelat.

Penentuan dimensi menara:

Neraca massa A total dalam kolom

$$G_1y_1 + L_2x_2 = G_2y_2 + L_1x_1$$

$L, G$  : kecepatan cairan dan gas ( $\text{mol}/\text{j.ft}^2$ )

$x, y$  : fraksi mol A dalam L, G

Jika dinyatakan dalam bebas solut:

$$X = \frac{x}{1-x}$$

$$Y = \frac{y}{1-y}$$

Komponen yang terdiri dari komponen A dan gas inert. Komponen A akan terlarut (terserap) oleh solven B dan inert tidak maka komponen A akan keluar dengan cairan B dari bagian bawah menara, sedang sisa A dan gas inert yang tidak terserap akan keluar dari bagian atas menara.

Asumsi: tidak ada gas inert yang terlarut, tidak ada solven yang menguap

X: fraksi mol A di fasa cair dengan dasar solven bebas solut (A)

$$X = \frac{\text{mol A}}{\text{mol solven}}$$

$$Y = \frac{\text{mol A}}{\text{mol gas inert}}$$

$L_S, G_S$ : kecepatan bebas solut

Persamaan menjadi:  $G_S (Y_1 - Y_2) = L_S (X_1 - X_2)$

Neraca massa A di gas dalam elemen volum  $S \Delta z$ , *steady state*

A masuk -A keluar - A yang pindah ke cairan = akumulasi = 0

$$S G_S Y|_z - S G_S Y|_{z-\Delta z} - N_A S \Delta z = 0$$

$$N_A = K_Y a (Y - Y') dz$$

$$G_S dY = K_Y a (Y - Y') dz$$

$$\int_0^z dz = \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{G_S}{K_Y a} \frac{dY}{Y - Y'}$$

Neraca massa A di loop B:

$$L_S X + G_S Y_2 = L_S X_2 + G_S Y$$

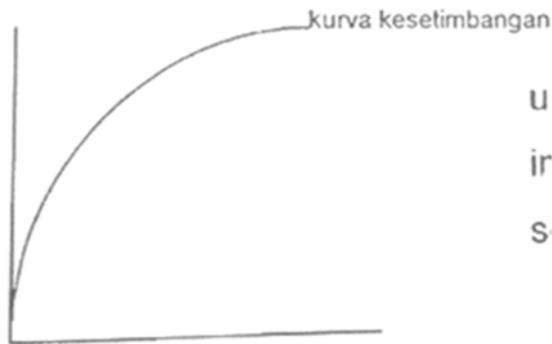
$$X = \frac{G_S}{L_S} Y + X_2 \frac{G_S}{L_S} Y_2 \text{ (garis operasi)}$$

$Y'$ : fraksi mol A di fase gas yang ada di kesetimbangan dengan fraksi mol A di fase cair (X)

Asumsi:  $K_Y a$  (koefisien perpindahan massa overall volumetris sepanjang menara relatif konstan

$$Z = \frac{G_s}{K_Y a} \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{dY}{Y - Y'}$$

Untuk mencari tebal packing,  $K_Y a$  diketahui, integrasi numeris bisa dilakukan dengan cara sebagai berikut:



Gambar 17.  
Kurva kesetimbangan

$$\int_{x_1}^{x_2} y \, dx = \text{luas kurva di bawah } y = f(x)$$

$f(x)$  diketahui maka integrasi dilakukan secara analitis. Jika tidak diketahui, maka dapat dilakukan secara numeris, dengan cara *trapezoidal rule*.

$$L = \left\{ \frac{y_0}{2} + y_1 + y_2 + y_3 + \dots + \frac{y_n}{2} \right\} \Delta x$$

Perhitungan dimulai dari  $Y_1$  untuk menghitung  $X_1$ , dari garis operasi, dengan kurva kesetimbangan dapat dicari  $Y^*_1$ , perhitungan dilanjutkan dengan  $Y + \Delta Y$ , kemudian dicari luas daerah di bawah kurva  $\frac{1}{Y - Y'}$  versus  $Y$ .

Y	Dengan garis operasi, X	Dengan kurva setimbang, Y*	$\frac{1}{Y - Y^*}$
Y <sub>1</sub>	X <sub>1</sub>	Y* <sub>1</sub>	$\frac{1}{Y_1 - Y_1^*}$
Y <sub>2</sub>	X <sub>2</sub>	Y* <sub>2</sub>	$\frac{1}{Y_2 - Y_2^*}$

Dalam perhitungan diperlukan kLa dan kGa yang dapat dicari dari persamaan empiris untuk sistem di dalam menara bahan isian.

$$\frac{k_L a}{D_L} = \alpha \left( \frac{L}{\mu_L} \right)^{1-n} \left( \frac{\mu_L}{\rho_L D_L} \right)^{0,5}$$

k<sub>L</sub>a : lbmol/j.cuft(lbmol/cuft)=1/jam

D<sub>L</sub> : difusivitas solut dalam cairan (ft<sup>2</sup>/jam)

α, n : konstanta, tergantung jenis *packing*

L : kecepatan massa cairan dasar kosong (lb/jam ft<sup>2</sup>)

μ<sub>L</sub> : viskositas cairan (lb/ft. Jam)

ρ<sub>L</sub> : densitas cairan (lb/cuft)

Berikut ini adalah tabel karakteristik *packing*.

Tabel 9. Karakteristik Packing

Jenis packing	α,	N	B	P	r
3/8 in Rasching rings	550	0,46			
1/2 in	280	0,35	0,0065	0,9	0,39
1 in	100	0,22	0,36	0,77	0,2
1 1/2 in	90	0,22	0,0142	0,72	0,38
2 in	80	0,22	0,048	0,88	0,09
1/2 in Berl-saddles	150	0,28	0,0085	0,75	0,4
1 in	170	0,28			
1 1/2 in	160	0,28			

## Rangkuman Materi

1. Kesetimbangan *interface*:

$$P_{Ai} = H \cdot C_{Ai}$$

2. Macam alat transfer massa: menara sembur, menara gelembung, menara isian, dan menara pelat

## Latihan Soal

1. Jelaskan disertai gambar prinsip kerja alat pemisah menara distilasi jenis *bubble tower*!
2. Air tumpah ke lantai, tinggi permukaan tumpahan air 0,04 in, luas permukaan tumpahan air 1 ft<sup>2</sup> kondisi air suhu 90°F. Kondisi udara tekanan 1 atm, suhu 90°F, kelembapan absolut 0,002 lb H<sub>2</sub>O/lb udara kering. Air menguap dan berdifusi ke udara melalui lapisan udara setebal 0,2 in. Berapa waktu yang diperlukan untuk menguapkan seluruh air?
3. Absorpsi amonia dari udara dengan air dilakukan dengan menara bahan isian  $z = 27$  in, 1 in rasching ring diperoleh data:
  - Suhu cairan = 28°C
  - Kecepatan cairan (bebas amonia) = 3000 lb/jam ft<sup>2</sup>
  - Tekanan top = 755,2 mmHg
  - Tekanan bottom = 755,5 mmHg
  - Kecepatan udara (bebas amonia) = 230 lb/jam.ft<sup>2</sup>
  - Komposisi
    - Top cairan = 0,0000127 lb NH<sub>3</sub>/lb H<sub>2</sub>O
    - Bottom cairan = 0,000620 lb NH<sub>3</sub>/lb H<sub>2</sub>O
    - Top gas = 0,000438 lb NH<sub>3</sub>/lb udara
    - Bottom gas = 0,00837 lb NH<sub>3</sub>/lb udara

Hitunglah:

- a.  $K_{Ga}$
- b.  $k_{Ga}$
- c. Cek dengan persamaan empiris  $k_{Ga}$

4. Sebuah menara dengan diameter 15 cm, digunakan untuk absorpsi amonia ( $\text{NH}_3$ ). Komposisi gas ( $y_A$ ) dari 3,6 menjadi 0,3 mol %. Air diumpankan dari atas menara dengan kecepatan ( $L_S$ ) 14,5 mol/s dan kecepatan gas umpan ( $G_S$ ) 8 mol/s. Menara dioperasikan secara isoterma pada suhu 293 K dan tekanan  $1,013 \times 10^5$  Pa. Konstanta transfer massa overall ( $K_{YA}$ ) diasumsikan  $2 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \Delta Y_A$ . Tentukan tinggi tower!

Data kesetimbangan pada suhu 293 K sebagai berikut:

$X_A$ (mol $\text{NH}_3$ / mol $\text{NH}_3$ - tanpa air)	0	0,0164	0,0252	0,039	0,0445	0,0722
$Y_A$ (mol $\text{NH}_3$ / mol $\text{NH}_3$ - tanpa udara)	0	0,021	0,032	0,042	0,053	0,080



## Humidifikasi dan Dehumidifikasi

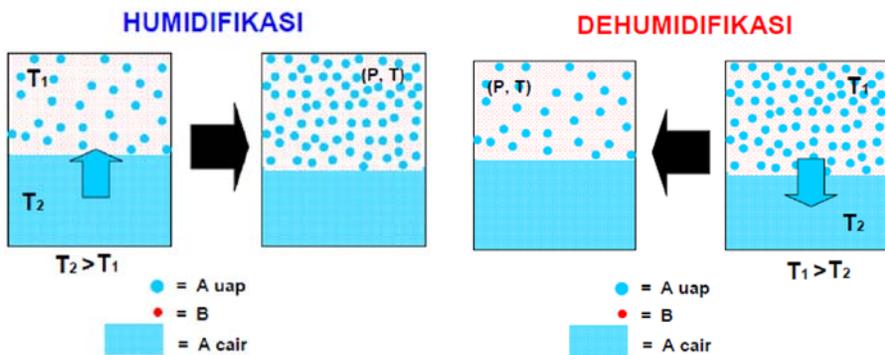
### TUJUAN PEMBELAJARAN

Mahasiswa dapat menjelaskan operasi humidifikasi dan dehumidifikasi berikut dengan aplikasinya dalam industri.

### A. Humidifikasi

Proses transfer massa air dari fase cair (A) ke dalam campuran gas yang terdiri atas udara (B) dan uap air (A) disebut sebagai proses humidifikasi. Sedangkan proses dehumidifikasi adalah proses transfer massa uap air dari campuran uap air (A) dan udara (B) ke dalam fase cair (A). Proses yang terlibat dalam humidifikasi yaitu, transfer massa air dari fase cair ke dalam campuran gas dari udara dan uap air. Sedangkan proses yang terlibat dalam dehumidifikasi yaitu, transfer uap air dari keadaan uap ke keadaan cair.

Pengertian lain proses humidifikasi adalah transfer cairan (A) ke dalam campuran (gas B dan uap air A) yang disebabkan oleh kontak antara cairan A dengan campurannya. Sedangkan pengertian lain dehumidifikasi adalah transfer cairan A dari campurannya karena proses pendinginan. Konsep transfer massa pada proses humidifikasi dan dehumidifikasi dapat dilihat pada Gambar 18 di bawah ini.



Gambar 18.

Konsep Transfer Massa Humidifikasi dan Dehumidifikasi

**Kelembapan/Humidity (H)** merupakan massa uap air yang terkandung setiap 1 kg massa udara kering. Kelembapan yang ditentukan hanya bergantung pada tekanan parsial  $P_A$  uap air di udara dan pada tekanan total  $P$  (diasumsikan sepanjang bab ini adalah 101,325 kPa atau 1,0 atm abs atau 760 mmHg). Dengan menggunakan berat molekul air (A) 18,02

dan udara 28,97 maka kelembapan H dalam kg H<sub>2</sub>O/kg udara kering adalah sebagai berikut:

$$H \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg dry air}} = \frac{PA \text{ kg mol H}_2\text{O}}{P - PA \text{ kg mol air}} \times \frac{18,02 \text{ kg H}_2\text{O}}{\text{kg mol H}_2\text{O}} \times \frac{1}{\frac{28,97 \text{ kg air}}{\text{kg mol air}}}$$

$$H = \frac{18,02 PA}{28,97 P - PA} \quad (1)$$

**Udara jenuh (HS)** didefinisikan sebagai uap air yang berada pada kesetimbangan dengan cairan pada kondisi tekanan dan suhu tertentu. Dalam campuran ini tekanan parsial uap air dalam campuran udara-air sama dengan PAS/tekanan uap murni pada suhu yang diberikan. Oleh karena itu, **kelembapan saturasi (HS)** adalah sebagai berikut:

$$H_s = \frac{18,02}{28,97} \frac{PAS}{P - PAS} \quad (2)$$

**Persentase kelembapan (HP)** merupakan 100 kali kelembapan actual udara dibagi dengan kelembapan pada kondisi jenuh (HS) pada suhu dan tekanan yang sama.

$$H_p = 100 \frac{H}{H_s} \quad (3)$$

Sedangkan jumlah saturasi dari campuran uap air – udara juga diberikan sebagai **persentase kelembapan relative (HR)** menggunakan tekanan parsial:

$$H_R = 100 \frac{PA}{PAS} \quad (4)$$

Perhatikan bahwa  $H_R \neq H_P$  karena  $H_P$  menyatakan tekanan parsial dengan menggabungkan persamaan di atas menjadi persamaan berikut ini:

$$H_p = 100 \frac{H}{H_s} = (100) \frac{18,02}{28,97} \frac{PA}{P - PA} / \frac{18,02}{28,97} \frac{PAS}{P - PAS} = \frac{PA}{PAS} P - \frac{PAS}{P - PAS} (100) \quad (5)$$

**Contoh Soal 5.1. Kelembapan dari data tekanan uap**

Udara di sebuah ruangan berada pada 26,7 °C (80 F) dan tekanan 101,325 kPa dan mengandung uap air dengan tekanan parsial  $P_A = 2,76$  kPa. Hitunglah:

- Kelembapan, H
- Kelembapan saturasi,  $H_S$  dan persentase kelembapan, HP
- Persentase kelembapan relative, HR

**Jawab:**

Dari steam tabel pada 26,7 °C, tekanan uap air adalah  $P_{AS} = 3,50$  kPa (0,507 psia). Juga  $P_A = 2.76$  kPa dan  $P = 101.3$  kPa (14.7 psia).

- menggunakan Persamaan (1),

$$H = \frac{18,02}{28,97} \frac{P_A}{P - P_A} = \frac{18,02(2,76)}{28,97(101,3 - 2,76)} = 0,01742 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kg air}}$$

- perhitungan kelembapan saturasi menggunakan Persamaan (2),

$$H_s = \frac{18,02}{28,97} \frac{P_{AS}}{P - P_{AS}} = \frac{18,02(3,50)}{28,97(101,3 - 3,50)} = 0,02226 \frac{\text{kgH}_2\text{O}}{\text{kg air}}$$

perhitungan persentase kelembapan menggunakan Persamaan (3)

$$H_p = 100 \frac{H}{H_s} = \frac{100(0,01742)}{0,02226} = 78,3\%$$

- perhitungan persentase kelembapan relatif menggunakan Persamaan (4),

$$H_R = 100 \frac{P_A}{P_{AS}} = \frac{100(2,76)}{3,50} = 78,9\%$$

**B. Titik Embun (*Dew Point*) dari Campuran Udara dan Uap Air**

Suhu ketika campuran udara dan uap air tertentu akan jenuh disebut suhu titik embun (*dew point temperature*) atau titik embun (*dew point*) saja. Misalnya, pada 26,7 °C (80 F), tekanan uap air saturasi adalah  $P_{AS} = 3,50$  kPa (0,507 psia). Oleh karena itu, 26,7 °C merupakan titik embun

campuran yang mengandung uap air dan dengan tekanan parsial 3,5 kPa. Jika campuran uap air-udara adalah pada 37,8 °C (sering disebut suhu dry bulb, karena ini adalah suhu aktual termometer dry bulb akan menunjukkan dalam campuran ini) dan mengandung uap air PA = 3,50 kPa, campuran tidak akan jenuh. Pada pendinginan hingga 26,7 °C, udara akan jenuh, yaitu pada titik embun. Pada pendinginan lebih lanjut, beberapa uap air akan mengembun, karena tekanan parsial tidak bisa lebih besar dari tekanan uap saturasi.

### C. Panas Lembap (*Humid Heat, Cs*) dari Campuran Uap Air-Udara

Panas lembap Cs adalah jumlah panas dalam J (atau kJ) yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 kg udara kering ditambah uap air yang terbentuk sebesar 1 K atau 1°C. Kapasitas panas udara dan uap air dapat diasumsikan konstan pada rentang suhu yang biasanya dijumpai pada 1,005 Kj/kg K udara kering dan uap air 1,88 Kj/kg. K masing-masing. Oleh karena itu, untuk satuan SI dan english unit dapat dituliskan di bawah ini,

$$\begin{aligned} C_s \text{ kJ/kg dry air} \cdot \text{K} &= 1,005 + 1,88H \text{ (SI)} \\ C_s \text{ btu/lb}_m \text{ dry air} \cdot \text{°F} &= 0,24 + 0,45H \text{ (English)} \end{aligned} \quad (6)$$

Volume lembap  $V_H$  merupakan volume total setiap 1 kg udara kering ditambah uap yang dikandungnya pada 1 atm tekanan abs dan suhu gas yang diberikan. Menggunakan hukum gas ideal,

$$\begin{aligned} V_H \text{ m}^3/\text{kg dry air} &= \frac{22,41}{273} T \text{ K} \left( \frac{1}{28,97} + \frac{1}{18,02} H \right) \\ &= (2,83 \times 10^{-3} + 4,56 \times 10^{-3} H) T \text{ K} \\ V_H \text{ ft}^3/\text{kg dry air} &= \frac{359}{492} T^{\circ} \text{R} \left( \frac{1}{28,97} + \frac{1}{18,02} H \right) \\ &= (0,0252 + 0,0405H) T^{\circ} \text{R} \end{aligned} \quad (7)$$

Untuk campuran uap air-udara jenuh,  $H = H_s$  dan  $v_h$  adalah volume jenuh.

#### D. Entalpi Total (*Total Enthalpy*) Campuran Uap Udara-Air

$H_y$  (J/kg atau KJ/kg) merupakan entalpi total tiap kg udara ditambah uap airnya. Jika  $T_0$  merupakan suhu datum untuk kedua komponen, maka entalpi total merupakan panas sensible ditambah panas laten pada  $T_0$ . Perhatikan bahwa  $(T-T_0) C = (T-T_0) K$  dan bahwa entalpi ini disebut sebagai air fase cair.

$$\begin{aligned} H_y \text{ kJ/kg dry air} &= C_s (T-T_0) + H\lambda_0 = (1,005 + 1,88H)(T-T_0 \text{ } ^\circ\text{C}) + H\lambda_0 \\ H_y \text{ btu/lb}_m \text{ dry air} &= (0,24 + 0,45H)(T-T_0 \text{ } ^\circ\text{F}) + H\lambda_0 \end{aligned} \quad (8)$$

Jika total entalpi dirujuk ke suhu dasar  $T_0$  dari  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  ( $32 \text{ F}$ ), persamaan untuk  $H_y$  menjadi:

$$\begin{aligned} H_y \text{ kJ/kg dry air} &= (1,005 + 1,88H) (T^\circ\text{C} - 0) + 2501,4H \text{ (SI)} \\ H_y \text{ btu/lb}_m \text{ dry air} &= (0,24 + 0,45H) (T^\circ\text{F}-32) + 1075,4H \text{ (English)} \end{aligned} \quad (9)$$

#### E. Bagan Kelembapan (*Humidity Chart*) Campuran Uap Air-Udara

Bagan yang terdiri dari sifat-sifat campuran uap air-udara pada tekanan  $1,0 \text{ atm abs}$  adalah bagan kelembapan (humidity chart) yang terdapat pada Gambar 8.2. Dalam gambar ini kelembapan  $H$  diplotkan versus suhu sebenarnya dari campuran uap air-udara (suhu dry bulb). Kurva yang ditandai 100% berjalan ke atas ke kanan memberikan kelembapan saturasi  $H_S$  sebagai fungsi suhu. Dalam contoh soal 1, untuk  $26,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $H_S$  dihitung sebagai  $0,02226 \text{ kg H}_2\text{O/kg udara}$ . Merencanakan titik ini untuk  $26,7 \text{ } ^\circ\text{C}$  ( $80 \text{ F}$ ) dan  $H_S = 0,02226$  pada Gambar 8.2, jatuh pada garis jenuh 100%. Setiap titik di bawah garis saturasi merupakan campuran uap air-udara tak jenuh. Garis lengkung di bawah garis saturasi 100% dan berjalan ke atas ke kanan mewakili campuran tak jenuh dari persentase kelembapan tertentu  $H_P$ . Turun ke bawah secara vertikal dari garis saturasi pada suhu tertentu, garis antara saturasi 100% dan nol kelembapan  $H$  (garis horizontal bawah) dibagi secara merata menjadi 10 kenaikan masing-masing 10%. Semua persentase garis kelembapan  $H_P$  disebutkan

dan garis kelembapan saturasi HS dapat dihitung dari data untuk air bertekanan uap.

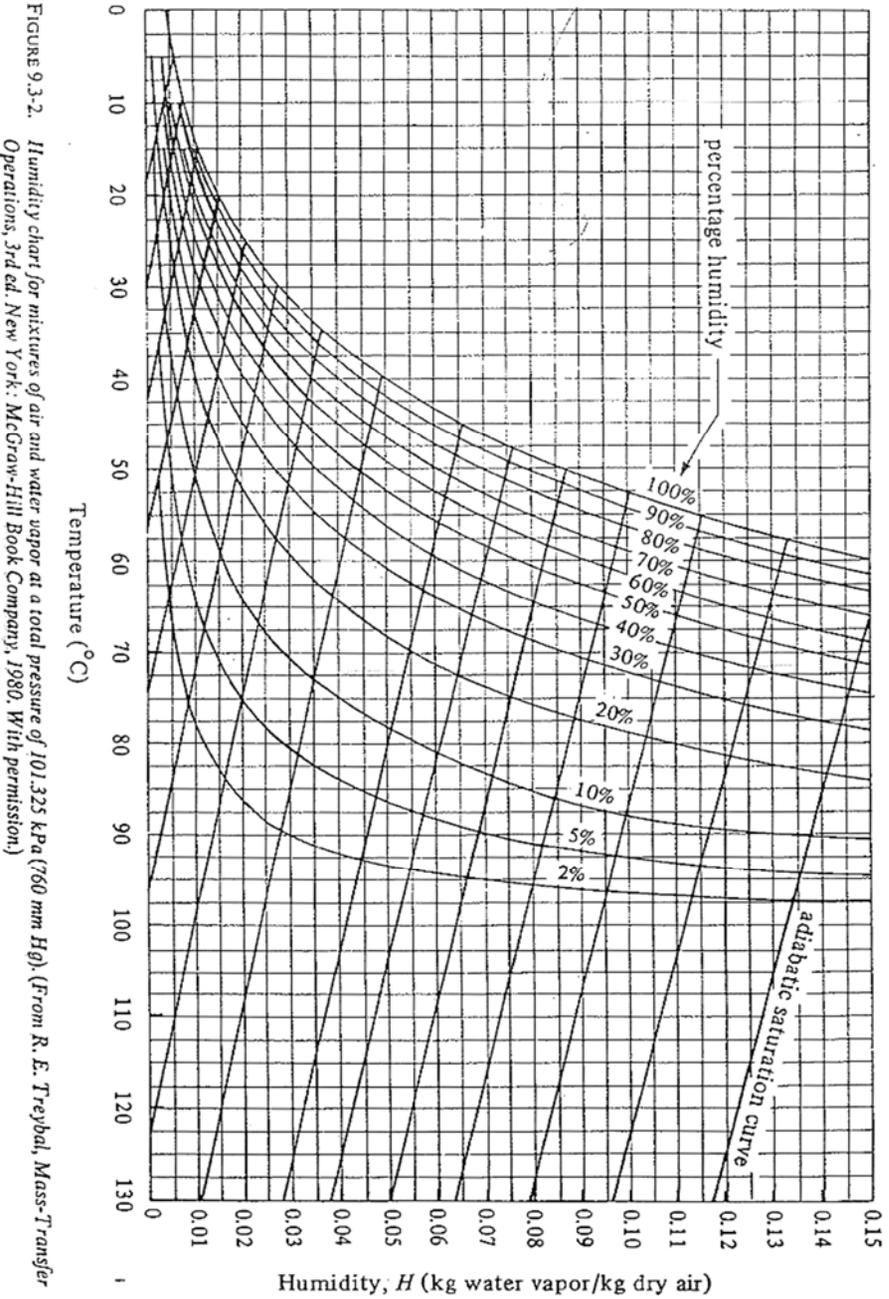


FIGURE 9.3-2. Humidity chart for mixtures of air and water vapor at a total pressure of 101.325 kPa (760 mm Hg). (From R. E. Treybal, Mass-Transfer Operations, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1980. With permission.)

**Contoh Soal 5.2. Menggunakan Bagan Kelembapan**

Pengering udara masuk memiliki suhu (suhu dry bulb) 60 °C (140 F) dan titik embun (dew point) 26,7 °C (80 F). Dengan bantuan grafik kelembapan, tentukanlah kelembapan aktual, persentase kelembapan, panas lembap dan volume lembap dalam satuan SI dan Inggris!

**Jawab:**

Titik embun 26,7°C adalah suhu saat campuran yang diberikan berada pada saturasi 100%. Mulai dari 26,7°C, Gambar 8.2 dan menggambar garis vertikal sampai memotong garis untuk kelembapan 100%, kelembapan  $H = 0,0225$  kg H<sub>2</sub>O/kg udara kering dibaca dari plot. Ini adalah kelembapan aktual udara pada 60°C. Dinyatakan dengan cara lain jika udara pada 60°C dan memiliki kelembapan  $H = 0,0225$  didinginkan, titik embunnya akan menjadi 26,7 C. Dalam satuan bahasa Inggris,  $H = 0,0225$  lb H<sub>2</sub>O/lb udara kering. Menemukan titik  $H = 0,0225$  dan  $T = 60^\circ\text{C}$  pada grafik, persentase kelembapan HP ditemukan 14%, dengan interpolasi linier secara vertikal antara garis 10 dan 20%. (cara interpolasi sama dengan interpolasi termodinamika).

Panas lembap untuk  $H = 0,0225$  adalah

$$\begin{aligned} C_s &= 1,005 + 1,880(0,0225) \\ &= 1,047 \frac{\text{kJ}}{\text{kg dry air} \cdot \text{K}} \text{ or } 1,047 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_s &= 0,24 + 0,45(0,0225) \\ &= 0,250 \text{ btu/lb}_m \text{ dry air} \cdot ^\circ\text{F} \quad (\text{English}) \end{aligned}$$

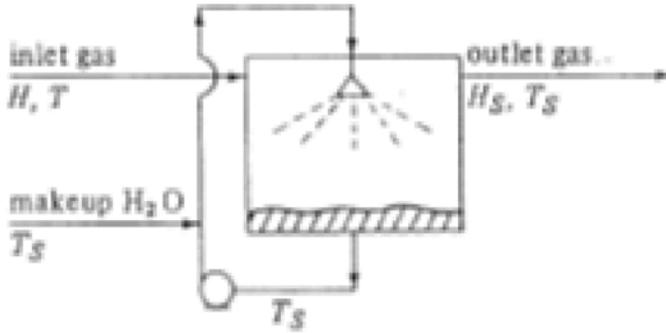
Volume lembap pada 60 °C (140 F), dari Persamaan (7) adalah

$$\begin{aligned} v_H &= (2,83 \times 10^{-3} + 4,56 \times 10^{-3} \times 0,0225)(60 + 273) \\ &= 0,977 \frac{\text{m}^3}{\text{kg dry air}} \end{aligned}$$

*In English Units,*

$$V_H = (0,0252 + 0,0405 \times 0,0225)(460 + 140) = 15,67 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}_m \text{ dry air}}$$

Berikut ini merupakan gambar gas masuk dari campuran air-udara yang dihubungkan dengan semprotan air. Gas yang keluar memiliki kelembapan dan suhu yang berbeda dan prosesnya adiabatik. Air diresirkulasi, dengan sedikit air make-up ditambahkan.



Gambar 19.  
Sistem Adiabatik Udara-Uap Air

Suhu air yang diresirkulasi mencapai suhu kondisi steady state yang disebut suhu saturasi adiabatik,  $T_s$ . Jika gas masuk pada suhu  $T$  dengan kelembapan  $H$  tidak jenuh maka  $T_s$  akan lebih rendah dari  $T$ . Jika gas masuk pada suhu  $T$  dengan kelembapan  $H$  tidak jenuh maka  $T_s$  akan lebih rendah dari  $T$ . Jika kontak antara gas masuk dengan semprotan air cukup untuk membawa gas dan cairan ke kesetimbangan maka udara yang meninggalkan akan jenuh pada suhu  $T_s$  dan kelembapan  $H_s$ . Keseimbangan entalpi (keseimbangan panas) selama proses dapat ditulis dengan menggunakan datum dari  $T_s$ . Entalpi  $H_2O$  make-up kemudian nol. Ini berarti bahwa total entalpi dari campuran gas yang masuk = entalpi dari campuran gas yang meninggalkan, atau menggunakan Persamaan (10),

$$C_s(T-T_s) + H\lambda_s = C_s(T_s-T_s) + H_s\lambda_s \tag{10}$$

Atau, menata ulang dan menggunakan Persamaan (11) untuk  $c_s$ ,

$$\frac{H - H_s}{T - T_s} = -\frac{C_s}{\lambda_s} = \frac{1,005 + 1,88H}{\lambda_s} \text{ (SI)}$$

$$\frac{H - H_s}{T - T_s} = \frac{0,24 + 0,45H}{\lambda_s} \text{ (English)} \tag{11}$$

Persamaan (11) adalah persamaan kurva humidifikasi adiabatik ketika diplot pada Gambar 17, yang melewati titik HS dan Ts pada kurva saturasi 100% dan titik-titik lain dari H dan T. Rangkaian garis ini, berjalan ke atas ke kiri, disebut garis humidifikasi adiabatik atau garis saturasi adiabatik. Karena  $c_s$  mengandung istilah H, garis adiabatik tidak cukup lurus ketika diplot pada bagan kelembapan (humidity chart). Jika campuran gas yang diberikan pada T1 dan H1 dihubungi untuk waktu yang cukup lama dalam saturator adiabatik, itu akan meninggalkan jenuh pada Hs1 dan Ts1. Nilai Hs1 dan Ts1 ditentukan dengan mengikuti garis saturasi adiabatik melalui titik T1, H1 sampai memotong garis saturasi 100%. Jika kontak tidak cukup, campuran yang tersisa akan menjadi persentase saturasi kurang dari 100 tetapi pada baris yang sama.

### Contoh Soal 5.3. Saturasi udara adiabatik

Aliran udara pada  $87,8^\circ\text{C}$  yang memiliki kelembapan  $H = 0,030$  kg  $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$  udara kering dihubungi dalam saturator adiabatik dengan air. Didinginkan dan dilembapkan hingga 90% saturasi.

- Berapa nilai akhir dari H dan T?
- Untuk saturasi 100%, berapakah nilai H dan T?

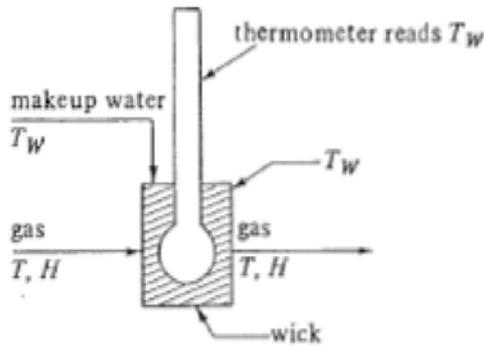
#### Jawab:

Untuk bagian (a), titik  $H = 0,030$  dan  $T = 87,8^\circ\text{C}$  terletak pada bagan kelembapan. Kurva saturasi adiabatik melalui titik ini diikuti ke atas ke kiri sampai memotong garis 90% pada  $42,5^\circ\text{C}$  dan  $H = 0,0500$  kg  $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$  udara kering. Untuk bagian (b), garis yang sama diikuti dengan saturasi 100%, yaitu  $T = 40,5^\circ\text{C}$  dan  $H = 0,0505$  kg  $\text{H}_2\text{O}/\text{kg}$  udara kering.

Suhu saturasi adiabatik adalah suhu kondisi steady state yang dicapai ketika sejumlah besar air dikontak dengan gas yang masuk. Temperatur wet bulb adalah suhu steady state non equilibrium yang dicapai ketika sejumlah kecil air dihubungkan dalam kondisi adiabatik oleh aliran gas yang kontinu. Karena jumlah cairan kecil, suhu dan kelembapan gas ti-

tidak berubah, bertentangan dengan kasus saturasi adiabatik, yaitu suhu dan kelembapan gas berubah.

Metode yang digunakan untuk mengukur suhu wet bulb diilustrasikan pada Gambar 20, yaitu termometer ditutupi oleh sumbu atau kain. Sumbu dijaga basah oleh air dan direndam dalam aliran uap air-udara yang memiliki suhu  $T$  (suhu dry bulb) dan kelembapan  $H$ . Pada kondisi steady state, air menguap ke aliran gas. Sumbu dan air didinginkan hingga  $T_w$  dan tetap pada suhu konstan ini. Panas laten penguapan persis seimbang dengan panas konvektif yang mengalir dari aliran gas di  $T$  ke sumbu pada suhu yang lebih rendah  $T_w$ .



Gambar 20.  
Pengukuran Suhu Wet Bulb

Keseimbangan panas pada sumbu dapat dibuat dengan mengambil suhu datum pada  $T_w$ . Jumlah panas yang hilang akibat penguapan dengan mengabaikan perubahan panas sensibel yang kecil dari cairan yang diuapkan dan radiasi, adalah

$$q = M_A N_A \lambda_w A \quad (12)$$

$q$  adalah kW (kJ/s),  $M_A$  adalah berat molekul air,  $N_A$  adalah kg mol  $H_2O$  yang menguap/s.m<sup>2</sup>,  $A$  adalah luas permukaan m<sup>2</sup>, dan  $\lambda_w$  adalah panas laten penguapan pada  $T_w$  dalam kJ/kg  $H_2O$ . Dalam satuan bahasa Inggris,  $q$  adalah btu/h,  $N_A$  adalah lb mol/h.ft<sup>2</sup> dan  $\lambda_w$  adalah btu/lbm  $H_2O$ . Fluks  $N_A$  adalah:

$$NA = \frac{k'y}{X_{bm}} (y_w - y) = ky(y_w - y) \tag{13}$$

$k'y$  adalah koefisien perpindahan massa dalam  $\text{kg mol/s.m}^2.\text{mol frac}$ ,  $X_{bm}$  adalah fraksi mol inert rata-rata yang panjang di udara,  $y_w$  adalah fraksi mol uap air dalam gas di permukaan, dan  $y$  adalah fraksi mol dalam gas. Untuk campuran encer,  $X_{bm} \cong 1.0$  dan  $k'y \cong ky$ . Hubungan antara  $H$  dan  $y$  adalah:

$$y = \frac{\frac{H}{MA}}{\frac{1}{MB} + \frac{H}{MA}} \tag{14}$$

$MB$  adalah berat molekul udara dan  $MA$  adalah berat molekul  $\text{H}_2\text{O}$ . Karena  $H$  kecil, dapat didekati dengan:

$$y \cong \frac{HMB}{MA} \tag{15}$$

Mengganti Persamaan (15) menjadi (13) dan kemudian mengganti hasilnya ke Persamaan (12).

$$q = M_B ky \lambda_w (H_w - H)A \tag{16}$$

Laju perpindahan panas konvektif dari aliran gas di  $T$  ke sumbu di  $T_w$  adalah:

$$q = h(T - T_w)A \tag{17}$$

$h$  adalah koefisien perpindahan panas dalam  $\text{kW/m}^2.\text{K}$  ( $\text{btu/h.ft}^2.\text{F}$ ). Menyusun Persamaan (16) hingga (17) dan mengatur ulang menjadi:

$$\frac{H - H_w}{T - T_w} = - \frac{\frac{h}{MBky}}{\lambda_w} \tag{18}$$

Data eksperimental pada nilai  $h/MB.ky$ , yang disebut rasio psikrometri, menunjukkan bahwa untuk campuran uap-air, nilainya sekitar 0,96-1,005. Karena nilai ini dekat dengan nilai  $c_s$  dalam Persamaan (11), sekitar 1,005, Persamaan (18) dan (11) hampir sama. Ini berarti bahwa garis saturasi adiabatik juga dapat digunakan untuk garis wet bulb dengan aku-

rasi yang cukup. (Perhatikan bahwa ini hanya berlaku untuk uap air dan tidak untuk zat lain, seperti benzena).

#### **Contoh Soal 5.4. Wet bulb temperature**

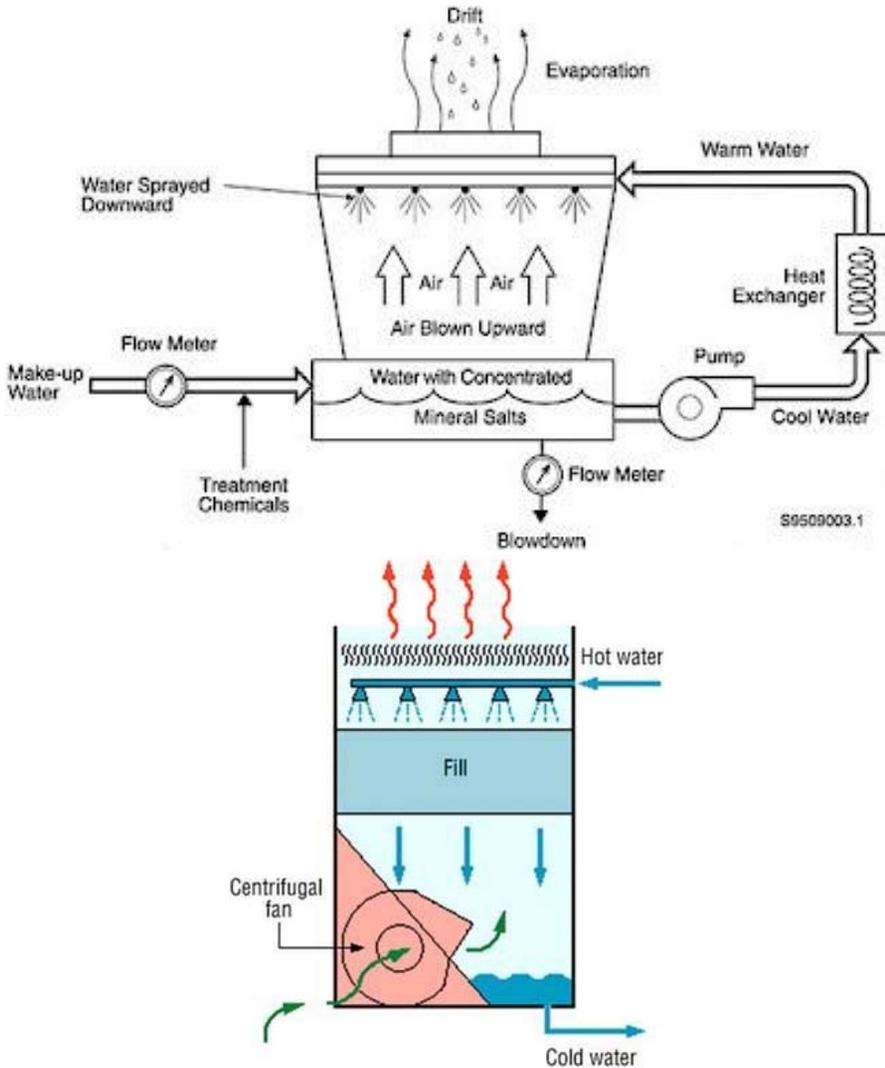
Campuran udara uap air yang memiliki suhu dry bulb  $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  dilewatkan di atas wet bulb seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 dan suhu wet bulb yang diperoleh adalah  $T_w = 29.5^{\circ}\text{C}$ . Berapa kelembapan campuran?

#### **Jawab:**

Suhu wet bulb  $29,5^{\circ}\text{C}$  dapat diasumsikan sama dengan suhu saturasi adiabatik  $T_s$ , seperti yang dibahas sebelumnya. Mengikuti kurva saturasi adiabatik  $29,5^{\circ}\text{C}$  hingga mencapai suhu dry bulb  $60^{\circ}\text{C}$ , kelembapannya adalah  $H = 0,0135\text{ kg H}_2\text{O/kg udara kering}$ .

#### **F. Humidifikasi Kontinu *Cooling Towers* (Menara Pendingin)**

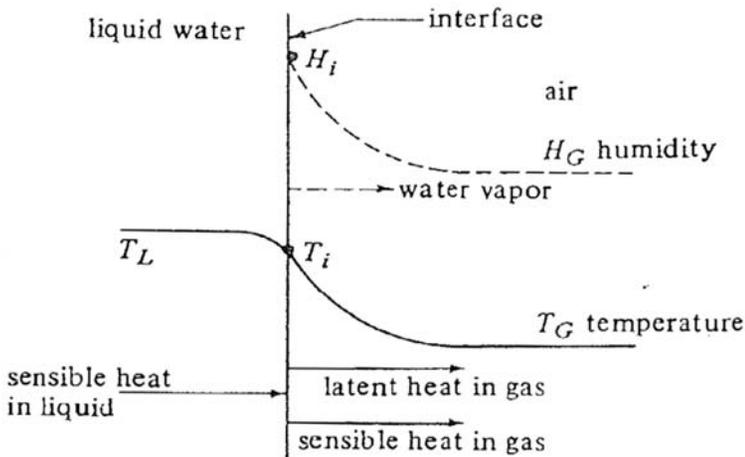
Air pendingin yang keluar dari alat-alat perpindahan panas (Heat Exchanger) akan dimanfaatkan kembali. Air proses tersebut didinginkan dengan menggunakan udara pendingin dan kontak dilakukan dalam suatu cooling tower. Perpindahan massa dan perpindahan panas terjadi secara simultan.



Gambar 21.  
Prinsip Kerja Cooling Tower

Pada bagian ini akan dibahas kinerja dan desain kontak udara-air dengan proses kontinu. Aplikasinya adalah proses pendinginan air pada menara pendingin karena ini adalah salah satu jenis proses yang paling penting. Pada menara pendingin air, air hangat mengalir berlawanan arah dengan arus udara. Biasanya air hangat memasuki bagian atas menara dan mengalir melalui packed tower dan keluar di bagian bawah menara, sedangkan udara masuk di bagian bawah menara dan mengalir ke atas dan

berkontak dengan air yang turun. Air tidak dapat didinginkan di bawah suhu wet bulb. Driving force untuk penguapan air adalah tekanan uap dengan kandungan sedikit air. Air hanya dapat didinginkan sampai suhu wet bulb, dan dalam praktiknya, air didinginkan hingga sekitar 3 K atau lebih di atas ini. Hanya sedikit air yang hilang karena penguapan dalam menara air pendingin. Karena panas laten penguapan air adalah sekitar 2300 kJ/kg, perubahan sekitar 8 K dalam suhu air berhubungan dengan penguapan air yang hilang sekitar 1,5%. Oleh karena itu, total aliran air biasanya diasumsikan konstan dalam perhitungan ukuran menara. Dalam humidifikasi dan dehumidifikasi, kontak antara fase gas dan fase cair diperlukan untuk laju perpindahan massa dan perpindahan panas yang besar. Resistansi fase gas mengontrol laju transfer. Menara dalam bentuk spray atau packed tower digunakan untuk memberikan area antar muka yang luas dan untuk memperbesar turbulensi dalam fase gas.



Gambar 22.

Profil Temperatur dan Konsentrasi Cooling Tower

Dalam Gambar 22 profil suhu dan profil konsentrasi kelembapan ditunjukkan pada antarmuka air-gas. Uap air berdifusi dari antarmuka ke fase gas dengan driving force dalam fase gas ( $H_i - H_g$ ) kg  $H_2O$ /kg udara kering. Tidak ada driving force untuk transfer massa dalam fase cair karena-

na air adalah cairan murni. Gaya penggerak suhu adalah TL-Ti dalam fase cair dan Ti-TG dalam fase gas. Panas sensible mengalir dari badan cairan ke antarmuka dalam cairan. Panas sensible mengalir dari *interface* ke aliran gas sedangkan panas laten meninggalkan *interface* dalam fase uap air kemudian berdifusi ke fase gas. Aliran panas sensible dari cairan ke antarmuka sama dengan aliran panas sensible dalam gas ditambah aliran panas laten dalam gas. Kondisi pada Gambar 20 terjadi di bagian atas menara pendingin.

Pada bagian bawah menara pendingin, suhu air lebih tinggi dari suhu wet-bulb udara tetapi di bawah suhu dry bulb. Kemudian arah aliran panas sensibel digambarkan pada Gambar 23. Total area antarmuka antara fase udara dan air tidak diketahui karena luas permukaan packed tidak sama dengan area antarmuka antara tetesan air dan udara. Oleh karena itu,  $a$ , yang didefinisikan sebagai  $m^2$  area antarmuka per  $m^3$  volume bagian packed ( $m^2/m^3$ ).

Koefisien perpindahan massa fase gas  $k_G$  dalam  $kg\ mol/s.m^2.Pa$  atau  $kg\ mol/s.m^2.atm$  untuk memberikan koefisien volumetrik  $k_G a$  dalam  $kg\ mol/s.m^3\ volume.Pa$  atau  $kg\ mol/s/m^3.atm$  ( $lb\ mol/h.ft^3.atm$ ). Proses ini dilakukan secara adiabatik dan berbagai aliran dan kondisi ditunjukkan pada Gambar 8.7, yaitu:

$L$  = aliran air,  $kg\ air/s.m^2$  ( $lbm/h.ft^2$ )

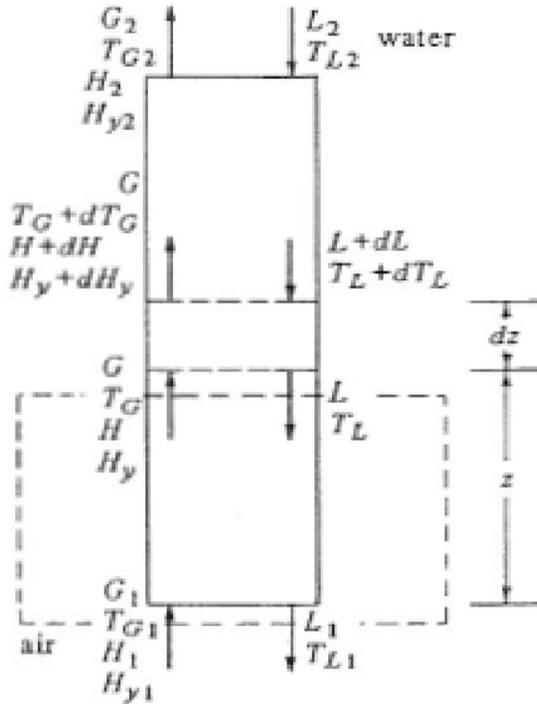
$TL$  = suhu air, C atau K

$G$  = aliran udara kering,  $kg/s.m^2$  ( $lbm/h.ft^2$ )

$TG$  = suhu udara, C atau K

$H$  = kelembapan udara,  $kg\ air/kg\ udara\ kering$  ( $lb\ air/lb\ udara\ kering$ )

$H_y$  = entalpi campuran udara-uap air,  $J/kg\ udara\ kering$  ( $btu/lbm\ udara\ kering$ )



Gambar 23.  
Pola Aliran Perpindahan Massa pada Cooling Tower

Entalpi  $H_y$  seperti yang diberikan dalam Persamaan (9) adalah  
 $H_y = c_s(T-T_0) + H\lambda_0 = (1,005 + 1,88H) 10^3 (T-0) + 2,501 \times 10^6 H$  (SI)  
 $H_y = c_s(T-T_0) + H\lambda_0 = (0,24 + 0,45H) (T-32) + 1075,4H$  (English)

Suhu dasar yang dipilih adalah 0 C atau 273 K (32 F). Perhatikan bahwa  $(T-T_0) C = (T-T_0) K$ . Membuat keseimbangan panas total untuk kotak garis putus-putus yang ditunjukkan pada Gambar 23, maka akan diperoleh garis operasi.

$$G (H_y - H_{y1}) = L_{CL} (T_L - T_{L1}) \tag{19}$$

Diasumsikan bahwa  $L$  konstan karena hanya sedikit yang diuapkan. Kapasitas panas  $CL$  dari cairan diasumsikan konstan pada  $4,187 \times 10^3$  J/kg.K (1,00 btu/lbm.F). Ketika diplot pada bagan  $H_y$  versus  $T_L$ , Persamaan (19) adalah garis lurus dengan kemiringan  $L_{CL}/G$ . Keseimbangan panas keseluruhan di kedua ujung menara adalah sebagai berikut:

$$G (H_{y2}-H_{y1}) = L_{CL} (T_{L2}-T_{L1}) \quad (20)$$

Menyusun keseimbangan panas untuk tinggi kolom  $dz$  dan mengabaikan istilah panas sensible dibandingkan dengan panas laten.

$$L_{CL} dT_L = G dH_y \quad (21)$$

Total perpindahan panas sensible dari cairan ke antarmuka pada Gambar 8.7 adalah:

$$L_{CL} dT_L = G dH_y = h_L \alpha dz (T_L - T_i) \quad (22)$$

$h_L \alpha$  adalah koefisien perpindahan panas volumetrik fase cair dalam  $W/m^3.K$  ( $btu/h/ft^3.F$ ) dan  $T_i$  adalah suhu antarmuka.

Untuk perpindahan massa adiabatik, laju perpindahan panas karena panas laten dalam uap air yang ditransfer dapat diperoleh dari Persamaan di bawah ini.

$$\frac{q^1}{A} = MB k_G \alpha P \lambda_0 (H_i - H_G) dz \quad (23)$$

$q\lambda/A$  dalam  $W/m^2$  ( $btu/h/ft^2$ ),  $MB$  = berat molekul udar.  $k_G \alpha$  adalah koefisien perpindahan massa volumetrik dalam gas dalam satuan  $kg \text{ mol}/s/m^3.Pa$ ,  $P$  = tekanan atm dalam  $Pa$ ,  $\lambda_0$  adalah panas laten air dalam air  $J/kg$ ,  $H_i$  adalah kelembapan gas pada antarmuka dalam  $kg \text{ air}/kg$  udara kering, dan  $H_G$  adalah kelembapan gas dalam fase gas dalam  $kg \text{ air}/kg$  udara kering. Nilai perpindahan panas sensibel dalam gas adalah:

$$\frac{q^s}{A} = h_G \alpha (T_i - T_G) \quad (24)$$

$q\lambda/A$  dalam  $W/m^2$  dan  $h_G \alpha$  adalah koefisien perpindahan panas volumetrik dalam gas dalam  $W/m^3.K$ .

Berdasarkan gambar 8.7, Persamaan (22) harus sama dengan jumlah Persamaan (23) dan (24).

$$G dH_y = M_B k_G \alpha P \lambda_0 (H_i - H_G) dz + h_G \alpha (T_i - T_G) dz \quad (25)$$

Dengan

$$\frac{hG\alpha}{MBkF\alpha} \cong C_s \quad (26)$$

Kemudian mengganti  $PkGA$  untuk  $kya$ ,

$$\frac{hG\alpha}{MBPkG\alpha} \cong C_s \quad (27)$$

Mengganti Persamaan (27) ke Persamaan (25) dan mengatur ulang menjadi,

$$G dH_y = MBkG\alpha P dz [(C_s T_i + \lambda_0 H_i) - (C_s T_G + \lambda_0 H_G)] \quad (28)$$

Menambah dan mengurangi  $C_s T_0$  di dalam kurung,

$$G dH_y = MBkG\alpha P dz \{C_s(T_i - T_0) + \lambda_0 H_i\} - [C_s(T_G - T_0) + \lambda_0 H_G] \quad (29)$$

Istilah di dalam kurung kurawal adalah  $(H_{yi} - H_y)$  dan Persamaan (29) menjadi

$$G dH_y = MBkG\alpha P dz (H_{yi} - H_y) \quad (30)$$

Mengintegrasikan, persamaan terakhir yang digunakan untuk menghitung ketinggian menara adalah:

$$\int_0^z dz = z = \frac{G}{MBkG\alpha P} \int_{H_{y1}}^{H_{y2}} \frac{dH_y}{H_{yi} - H_y} \quad (31)$$

$$-\frac{hL\alpha}{kG\alpha MBP} = \frac{H_{yi} - H_y}{T_i - T_L} \quad (32)$$

## Rangkuman Materi

1. Definisi humidifikasi adalah proses perpindahan air dari fase cair ke fase gas. Sedangkan definisi dehumidifikasi adalah proses perpindahan air dari fase gas ke fase cair. Humidifikasi melibatkan perpindahan massa air dari fase cair ke fase gas sedangkan dehumidifikasi kebalikannya.
2. Kelembapan (Humidity)  $H$  dari campuran merupakan massa uap air yang terkandung dalam setiap kg udara kering.
3. Udara jenuh ( $H_S$ ) adalah udara ketika uap air setimbang dengan fase cairannya pada suhu dan tekanan tertentu.
4. Persentase kelembapan adalah 100 kali kelembapan actual ( $H$ ) dari udara dibagi dengan kelembapan jenuh ( $H_S$ ) pada suhu dan tekanan yang sama.
5. **Titik Embun (*Dew point*)** dari campuran udara dan uap air. Suhu ketika campuran udara dan uap air tertentu akan jenuh disebut suhu titik embun (*dew point temperature*) atau titik embun (*dew point*) saja.
6. **Panas Lembap (*Humid Heat, Cs*)** dari campuran uap air-udara. Panas lembap  $C_s$  adalah jumlah panas dalam J (atau kJ) yang diperlukan untuk menaikkan suhu 1 kg udara kering ditambah uap air yang terbentuk sebesar 1 K atau 1 °C.
7. Volume lembap adalah volume total dalam m<sup>3</sup> setiap 1 kg udara kering ditambah uap yang dikandung pada tekanan 1 atm.
8. Entalpi total adalah jumlah entalpi setiap kg udara dengan uap air dalam satuan J/kg atau KJ/kg. Jika  $T_0$  adalah suhu datum yang dipilih maka entalpi total adalah panas sensible dari campuran uap air-udara ditambah panas laten.
9. **Bagan kelembapan (*humidity chart*) campuran uap air-udara** adalah bagan yang terdiri dari sifat-sifat campuran uap air-udara pada tekanan 1,0 atm abs adalah bagan kelembapan (humidity chart).
10. Suhu saturasi adiabatik adalah suhu kondisi steady state yang dicapai ketika sejumlah besar air dikontak dengan gas yang masuk. Temperatur wet bulb adalah suhu steady state non equilibrium yang dicapai

ketika sejumlah kecil air dihubungkan dalam kondisi adiabatik oleh aliran gas yang kontinu. Oleh karena jumlah cairan kecil, suhu dan kelembapan gas tidak berubah, bertentangan dengan kasus saturasi adiabatik, ketika suhu dan kelembapan gas berubah.

11. Aplikasi humidifikasi adalah proses pendinginan air pada menara pendingin karena ini adalah salah satu jenis proses yang paling penting. Dalam menara pendingin air, air hangat mengalir berlawanan arah dengan arus udara. Biasanya, air hangat memasuki bagian atas menara dan mengalir melalui packed tower dan keluar di bagian bawah menara. Sedangkan udara masuk di bagian bawah menara dan mengalir ke atas dan berkontak dengan air yang turun. Air tidak dapat didinginkan di bawah suhu wet bulb. Driving force untuk penguapan air adalah tekanan uap dengan kandungan sedikit air. Air hanya dapat didinginkan sampai suhu wet bulb, dan dalam praktiknya, air didinginkan hingga sekitar 3 K atau lebih di atas ini. Hanya sedikit air yang hilang karena penguapan dalam menara air pendingin. Oleh karena panas laten penguapan air adalah sekitar 2300 kJ/kg, perubahan sekitar 8 K dalam suhu air berhubungan dengan penguapan air yang hilang sekitar 1,5%. Oleh karena itu, total aliran air biasanya diasumsikan konstan dalam perhitungan ukuran menara.

## Latihan Soal

### 1. Persentase dan Kelembapan Relatif

Udara dalam suatu ruangan memiliki kelembapan  $H$  sebesar  $0,021 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$  udara kering  $32,2 \text{ }^\circ\text{C}$  dan tekanan absolut  $101,3 \text{ kPa}$ .

Hitung:

- Persentase kelembapan  $H_P$
- Persentase Kelembapan Relatif  $H_R$

### 2. Penggunaan Bagan Kelembapan

Udara yang masuk ke pengering memiliki suhu  $65,6^\circ\text{C}$  ( $150^\circ\text{F}$ ) dan titik embun  $15,6^\circ\text{C}$  ( $60^\circ\text{F}$ ). Dengan menggunakan bagan kelembapan, tentukan kelembapan aktual dan persentase kelembapan. Hitung volume kelembapan dari campuran ini dan juga hitung  $C_s$  menggunakan satuan SI dan Inggris.

### 3. Suhu Saturasi Adiabatik

Udara pada suhu  $82,2^\circ\text{C}$  dan memiliki kelembapan  $H = 0,0655 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$  udara kering ditampung dalam saturator adiabatik dengan air. Ini meninggalkan saturasi  $80\%$ .

- Berapakah nilai akhir dari  $H$  dan  $T$   $^\circ\text{C}$ ?
- Untuk saturasi  $100\%$ , berapakah nilai  $H$  dan  $T$ ?

### 4. Kelembapan dari Suhu Basah dan Kering Bulb

Campuran uap udara-air memiliki suhu bola kering  $65,6^\circ\text{C}$  dan suhu wet bulb dari  $32,2^\circ\text{C}$ . Berapakah kelembapan campuran?

---

## **Drying (Pengeringan)**

### **TUJUAN PEMBELAJARAN**

Mahasiswa dapat menjelaskan operasi *drying* (pengeringan) berikut aplikasinya dalam industri.

*Drying* : Penghilangan sejumlah kecil air atau cairan dari suatu zat padat dengan jalan menguapkannya ke dalam suatu aliran gas.

Evaporasi : Penghilangan sejumlah besar air/cairan dari bahan, air/cairan dihilangkan dalam bentuk uap pada titik didihnya.

- **Drying:** - *Final processing step*
  - Lebih mudah dalam packaging, handling
  - Salah satu cara pengawetan
- **Drying:** - *Batch*
  - Kontinu

### A. Cara Penghilangan Uap Air

- Kontak langsung (bahan kontak dengan udara panas).
- Vacuum drying, penguapan lebih cepat pada tekanan lebih kecil, panas secara tidak langsung, yaitu kontak dengan dinding.
- Freeze drying: air menyublim dari bahan yang membeku

### B. Kandungan Air Kesetimbangan

Seperti proses perpindahan massa lainnya, drying juga diperlakukan sama, yaitu pendekatan dengan hubungan kesetimbangan dan juga kecepatan perpindahan. Bahan yang dikeringkan kontak dengan campuran udara uap, maka diperlukan data keseimbangan antara udara-uap dengan bahan yang dikeringkan. Variabel yang penting adalah humidity udara yang kontak dengan padatan yang mempunyai kandungan air tertentu.

Suatu padatan basah jika kontak dengan udara dengan suhu dan kelembapan tetap, setelah lama akan diperoleh kandungan air dalam bahan mencapai keseimbangan. Kandungan air disebut kandungan air keseimbangan pada kelembapan suhu udara tertentu. Kandungan air dinyatakan dalam: kg air/kg bahan kering.

### C. Air Terikat dan Tidak Terikat

Air terikat diperoleh dari kurva pada kelembapan relatif 100%, sedangkan kelebihan air yang ada disebut air yang tidak terikat. Bahan yang mengandung air yang terikat disebut material yang higroskopis. Contoh: kayu, memotong kurva humidity 100% pada 30 kg H<sub>2</sub>O/100 kg bahan kering maka kayu tersebut mempunyai kandungan air terikat sebesar 30 kg. Jika kayu tersebut mengandung 34 kg air/100 kg bahan kering maka 4 kg merupakan air tak terikat.

### D. Air Bebas

- Kandungan air bebas: kandungan air di atas kandungan air kesetimbangan.
- Kandungan air bebas ini dapat dihilangkan dengan drying pada suhu dan kelembapan udara tertentu

### E. Kurva Kecepatan Pengeringan

Ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam proses pengeringan: ukuran pengering yang diperlukan, kondisi (suhu dan kelembapan) udara yang digunakan, waktu pengeringan. Kecepatan, *humidity*, suhu, arah aliran udara sama dan konstan maka keadaan ini disebut kondisi pengeringan tetap. Kurva kecepatan pengeringan diperoleh dari drying secara batch pada pengeringan konstan/tetap.

- **Penentuan Laju Pengeringan Secara Eksperimental**

Hal yang harus diperhatikan dalam melakukan percobaan pengeringan batch adalah data yang digunakan dalam kondisi percobaan harus semirip mungkin dengan yang akan digunakan dalam operasi skala besar. Berat sampel tidak boleh terlalu kecil dan harus didukung dalam tray yang serupa dengan yang berskala besar. Rasio pengeringan terhadap permukaan yang tidak mengering (permukaan berinsulasi) dan kedalaman lapisan harus sama. Kecepatan, kelembapan, suhu, dan arah udara harus sama dan konstan untuk menyimulasikan pengeringan di bawah kondisi pengeringan konstan.

## 1. Kurva Kecepatan Pengeringan untuk Kondisi Pengeringan Konstan

Konversi data percobaan menjadi kurva laju pengeringan. Data yang diperoleh dari pengeringan batch biasanya sebagai  $W$  total berat padatan basah pada rentang waktu tertentu selama periode pengeringan. Data-data ini dapat dikonversi ke data kecepatan pengeringan dengan cara-cara berikut. Pertama, data dihitung ulang. Jika  $W$  adalah berat padatan basah dalam kg total air ditambah padatan kering dan  $W_s$  adalah berat padatan kering dalam kg, maka:

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \frac{\text{kg total water}}{\text{kg dry solid}} \left( \frac{\text{lb total water}}{\text{lb dry solid}} \right) \quad (1)$$

Pada pengeringan konstan kadar air kesetimbangan  $X^*$  merupakan kg kesetimbangan kelembapan/kg padatan kering ditentukan, sehingga kadar air bebas  $X$  dalam kg air bebas/kg padatan kering dihitung untuk setiap nilai  $X_t$ .

$$X = X_t - X^* \quad (2)$$

Menggunakan data yang dihitung dari Persamaan (2), plot air bebas  $X$  versus waktu  $t$  dalam jam dibuat seperti Gambar 9.1a. Untuk mendapatkan laju kurva pengeringan dari plot ini, kemiringan garis singgung yang ditarik ke kurva pada Gambar 9.1a. dapat diukur, yang memberikan nilai  $dx/dt$  pada nilai  $t$  yang diberikan. Kecepatan  $R$  dihitung untuk setiap titik oleh:

$$R = - \frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad (3)$$

$R$  adalah kecepatan pengeringan dalam  $\text{kg H}_2\text{O}/\text{jam.m}^2$ ,  $L_s$  merupakan kg padatan kering yang digunakan dan  $A$  adalah luas permukaan pengeringan dalam  $\text{m}^2$ . Dalam English unit,  $R$  adalah  $\text{lbm H}_2\text{O}/\text{h.ft}^2$ ,  $L_s$  adalah  $\text{lbm}$  padatan kering dan  $A$  adalah  $\text{ft}^2$ . Untuk mendapatkan  $R$  dari Gambar 9.1a, digunakan nilai  $L_s/A$   $21.5 \text{ kg/m}^2$ . Kurva

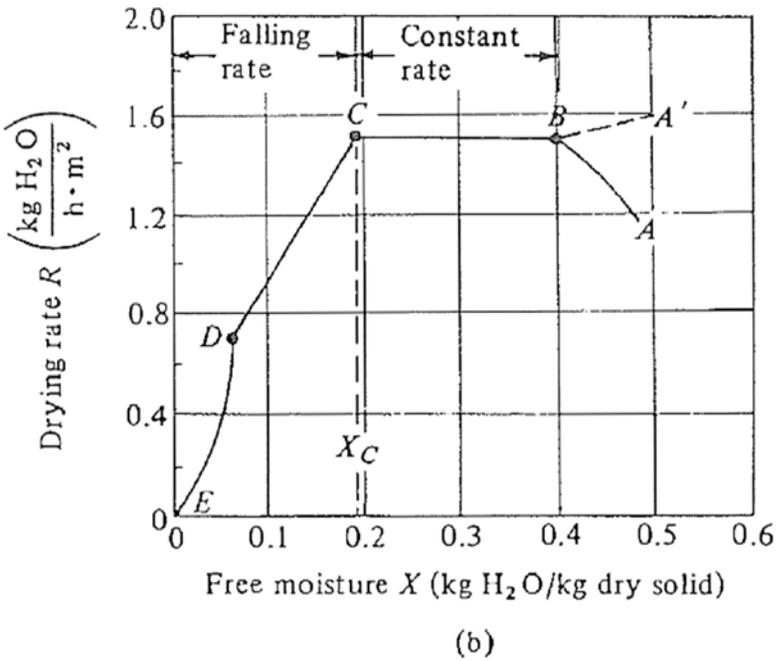
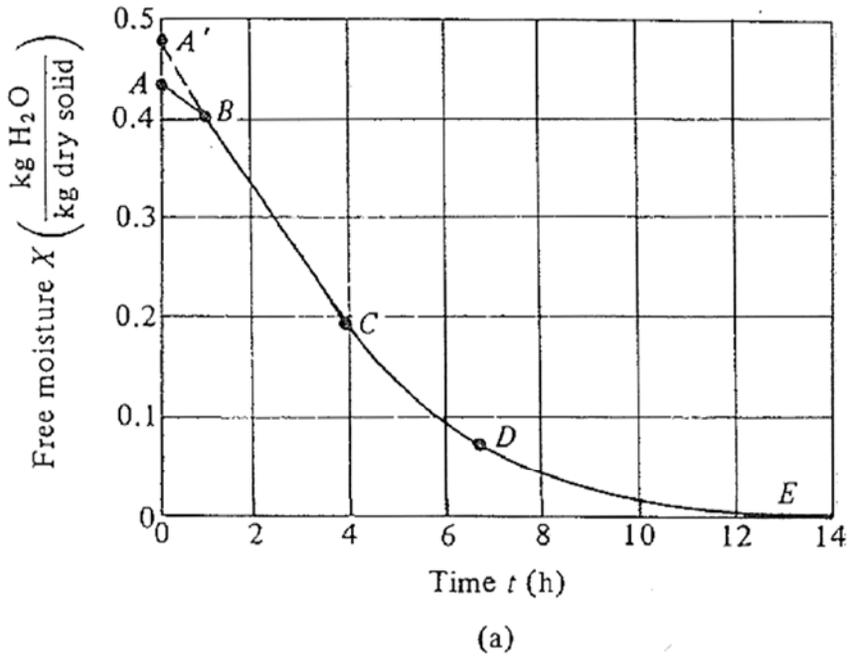
laju pengeringan kemudian diperoleh dengan memplot R terhadap kadar air, seperti pada Gambar 9.1b.

Metode lain untuk mendapatkan laju kurva pengeringan adalah dengan terlebih dahulu menghitung penurunan berat  $\Delta X$  untuk waktu yang singkat. Misalnya, jika  $X_1 = 0,350$  pada suatu waktu  $t_1 = 1,68$  jam dan  $X_2 = 0,325$  pada suatu waktu  $t_2 = 2,04$  jam,  $\Delta X / \Delta t = (0,350 - 0,325) / (2,04 - 1,68)$ .

Kemudian, gunakan Persamaan 3 dan  $L_s / A = 21.5$

$$R = - \frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt}$$

Kecepatan R adalah rata-rata selama periode 1,68 hingga 2,04 jam dan harus diplot pada konsentrasi rata-rata  $X = (0,350 + 0,325) / 2 = 0,338$ .



Gambar 24.  
Kurva Laju Pengeringan untuk Kondisi Pengeringan Konstan

Gambar 24 b menunjukkan kurva laju pengeringan untuk kondisi pengeringan konstan. Pada waktu nol, kadar air bebas awal ditunjukkan pada titik A. Pada awalnya, padatan biasanya pada suhu yang lebih dingin daripada suhu akhirnya, dan laju penguapan akan meningkat. Akhirnya pada titik B suhu permukaan naik ke nilai kesesimbangannya. Atau, jika benda padat cukup panas untuk mulai proses pengeringan, laju pengeringan dapat mulai pada titik A. Periode penyesuaian awal tidak stabil biasanya cukup singkat dan sering diabaikan dalam analisis waktu pengeringan.

Dari titik B ke C pada Gambar 24a garis lurus dan laju pengeringan konstan selama periode ini. Kecepatan konstan periode pengeringan ini ditunjukkan sebagai garis BC pada Gambar 24b. Pada titik C di kedua grafik terlihat laju pengeringan mulai menurun pada periode laju turun hingga mencapai titik D. Pada periode laju turun pertama ini, laju yang ditunjukkan sebagai CD garis pada Gambar 9.1b sering linier. Pada titik D laju pengeringan turun bahkan lebih cepat, sampai mencapai titik E, yaitu kadar air kesetimbangan adalah  $X^*$  dan  $X = X^* - X^* = 0$ . Dalam beberapa bahan yang dikeringkan, CD wilayah mungkin hilang sepenuhnya atau mungkin merupakan periode falling rate.

Pengeringan padatan yang berada pada kondisi laju pengeringan constant akan memberikan kurva dengan bentuk yang berbeda dengan periode falling rate, tetapi secara umum terdapat dua bagian utama kurva laju pengeringan - periode laju konstan dan periode falling rate. Pada periode pengeringan laju konstan, permukaan padatan awalnya sangat basah dan lapisan air kontinu terdapat pada permukaan pengeringan. Air ini seluruhnya adalah air yang tidak terikat dan air tersebut bertindak seolah-olah tidak terdapat padatan. Laju penguapan di bawah kondisi udara yang diberikan tidak tergantung pada padatan dan pada dasarnya sama dengan laju dari permukaan cairan bebas. Peningkatan kekasaran permukaan padat, bagaimana pun, da-

pat menyebabkan kecepatan yang lebih tinggi daripada permukaan datar.

Jika padatan berpori, sebagian besar air diuapkan dalam periode laju konstan disuplai dari interior padatan. Periode ini berlanjut hanya selama air disuplai ke permukaan secepat diuapkan. Penguapan selama periode ini mirip dengan dalam menentukan suhu wet bulb dan tanpa adanya perpindahan panas oleh radiasi atau konduksi, suhu permukaan kira-kira sama dengan suhu wet bulb.

Titik C pada Gambar 9.1b adalah pada kadar air bebas kritis  $X_c$ . Pada titik ini tidak ada cukup air di permukaan untuk mempertahankan lapisan air yang kontinu. Seluruh permukaan tidak lagi dibasahi dan area dibasahi terus menurun dalam periode falling rate pertama ini sampai permukaan benar-benar kering pada titik D pada Gambar 9.1b.

Periode falling rate kedua dimulai pada titik D ketika permukaan benar-benar kering. Panas untuk penguapan ditransfer melalui padatan ke zona penguapan. Air yang menguap bergerak melalui benda padat ke aliran udara.

Pada beberapa kasus tidak ada diskontinuitas yang tajam terjadi pada titik D, dan perubahan padatan dari sebagian basah ke kondisi benar-benar kering di permukaan sangat bertahap sehingga tidak ada perubahan tajam yang terdeteksi. Jumlah uap air yang dihilangkan pada periode falling rate mungkin relatif kecil tetapi waktu yang dibutuhkan mungkin lebih lama. Ini dapat dilihat pada Gambar 9.1. periode BC untuk pengeringan laju konstan berlangsung sekitar 3,0 jam dan mengurangi  $X$  dari 0,40 menjadi sekitar 0,19, pengurangan 0,21 kg  $H_2O$ /kg padatan kering. Periode falling rate CE berlangsung sekitar 9,0 jam dan mengurangi  $X$  hanya dari 0,19 menjadi 0.

## a. Metode Perhitungan untuk Periode Laju Pengeringan Kons-tan

### 1) Metode kurva pengeringan

Untuk memperkirakan waktu pengeringan untuk kumpulan bahan tertentu, metode terbaik didasarkan pada data eksperimental aktual yang diperoleh dalam kondisi ketika bahan umpan, luas permukaan yang relatif terbuka, kecepatan gas, suhu, dan kelembapan pada dasarnya sama dengan di akhir pengering. Maka waktu yang diperlukan untuk periode laju konstan dapat ditentukan langsung dari kurva pengeringan kadar air bebas terhadap waktu.

### Contoh Soal 6.1. Penggunaan Kurva Pengeringan

Padatan yang kurva pengeringannya ditunjukkan oleh Gambar 9.1a harus dikeringkan dari kadar air bebas  $X_1 = 0,38$  kg  $H_2O/kg$  padatan kering hingga  $X_2 = 0,25$  kg  $H_2O/kg$  padatan kering. Perkirakan waktu yang dibutuhkan!

#### Jawab:

Dari Gambar 9.1a untuk  $X_1 = 0,38$  t1 dibaca sebagai 1,28 jam. untuk  $X_2 = 0,25$  t2 = 3,08 jam. Oleh karenanya, waktu yang di-butuhkan adalah  $t = t_2 - t_1 = 3,08 - 1,28 = 1,80$  jam

### 2) Metode kurva laju pengeringan untuk periode laju kons-tan

Kecepatan pengeringan  $R$  didefinisikan oleh Persamaan (3) sebagai:

$$R = - \frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt}$$

Ini dapat disusun ulang dan diintegrasikan selama interval waktu untuk mengering dari  $X_1$  pada  $t_1 = 0$  hingga  $X_2$  pada  $t_2 = t$

$$t = \int_{t_1=0}^{t_2=t} dt = \frac{Ls}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R} \quad (4)$$

Jika pengeringan terjadi dalam periode laju konstan sehingga  $X_1$  dan  $X_2$  lebih besar dari kadar air kritis  $X_c$ , maka  $R = \text{konstan} = R_c$ , mengintegrasikan Persamaan 4 untuk periode laju konstan,

$$t = \frac{Ls}{A R_c} (X_1 - X_2) \quad (5)$$

### Contoh Soal 6.2. Waktu Pengeringan dari Laju Kurva Pengeringan

Ulangi contoh soal 1 tetapi gunakan Persamaan 5 dan Gambar 9.1b.

**Jawab:**

Seperti yang diberikan sebelumnya, nilai 21,5 untuk  $Ls/A$  digunakan untuk menyajikan Gambar. 9.1b dari 9.1a. Dari Gambar 9.1b,  $R_c = 1.51 \text{ kg H}_2\text{O/jam.m}^2$ . Mengganti menjadi Persamaan (5),

$$t = \frac{Ls}{A R_c} (X_1 - X_2) = \frac{21,5}{1.51} (0,38 - 0,25) = 1,85 \text{ h}$$

Hasil perhitungan ini dekat dengan nilai 1,80 jam pada contoh soal 1.

### b. Metode Perhitungan untuk Periode Pengeringan *Falling Rate*

#### 1) Metode yang menggunakan integrasi numeris

Pada periode falling rate seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.1b, laju pengeringan  $R$  tidak konstan tetapi menurun ketika pengeringan berlangsung melewati kadar air bebas kritis  $X_c$ . Ketika kadar air bebas  $X$  adalah nol, laju turun menjadi nol.

Waktu pengeringan untuk setiap wilayah antara  $X_1$  dan  $X_2$  telah diberikan oleh Persamaan (4). Jika nilainya konstan, Persamaan (4) dapat diintegrasikan untuk memberikan Persamaan (5). Namun, dalam periode falling rate,  $R$  bervariasi. Untuk segala bentuk kurva pengeringan falling rate, Persamaan (4) dapat diintegrasikan secara grafik dengan memplot  $1/R$  versus  $X$  dan menentukan area di bawah kurva dengan integrasi grafis atau numeris.

### Contoh Soal 6.3. Integrasi Numerik dalam Periode Pengeringan Falling Rate

Padatan basah yang kurva laju pengeringannya ditunjukkan oleh Gambar. 9.1b harus dikeringkan dari kadar air bebas  $X_1 = 0,38$  kg  $H_2O$ /kg padatan kering hingga  $X_2 = 0,04$  kg  $H_2O$ /kg padatan kering. Berat padatan kering adalah  $L_s = 399$  kg padatan kering dan  $A = 18,58$  m<sup>2</sup> permukaan pengeringan atas. Hitung waktu pengeringan. Perhatikan bahwa  $L_s/A = 399/18,58 = 21,5$  kg/m<sup>2</sup>.

#### Jawab:

Dari gambar 9.1b, kadar air bebas kritis adalah  $X_c = 0,195$  kg  $H_2O$ /kg padatan kering. Oleh karena itu, pengeringan berada dalam periode laju konstan dan laju penurunan. Untuk periode laju konstan,  $X_1 = 0,38$  dan  $X_2 = X_c = 0,195$ . Dari Gambar. 9.1b,  $R_c = 1,51$  kg  $H_2O$  / jam.m<sup>2</sup>. Mengganti menjadi Persamaan (5),

$$t = \frac{L_s}{A R_c} (X_1 - X_2) = \frac{399(0,38 - 0,195)}{(18,58)(1,51)} = 2,63 \text{ h}$$

Untuk periode falling rate, nilai  $R$  untuk berbagai nilai  $X$  dari Gambar 9.1b, disajikan dalam tabel berikut:

X	R	1/R	X	R	1/R
0.195	1.51	0.663	0.065	0.71	1.41
0.150	1.21	0.826	0.050	0.37	2.70
0.100	0.90	1.11	0.040	0.27	3.70

Untuk menentukan area dengan integrasi numerik menggunakan spreadsheet, hasil perhitungan disajikan dalam tabel berikut:

X	R	1/R	X	(1/R)	(1/R)
0.195	1.51	0.663	0.045	0.745	0.0335
0.150	1.21	0.826	0.050	0.969	0.0485
0.100	0.90	1.11	0.035	1.260	0.0441
0.065	0.71	1.408	0.015	2.055	0.0308
0.050	0.37	2.702	0.010	3.203	0.0320
0.40	0.27	3.704		Total =	0.1889

Luas persegi panjang pertama adalah tinggi rata-rata  $(0,663 + 0,826)/2$ , atau  $0,745$ , kali lebar  $\Delta X$   $(0,195 - 0,150)$  atau  $0,045$ , memberikan  $0,0335$ . Nilai-nilai lain juga dihitung secara serupa, sehingga totalnya adalah  $0,1889$ .

Kemudian substitusi ke Persamaan 4,

$$t = \frac{Ls}{A} \int_{X2}^{X1} \frac{dX}{R} = \frac{399}{18,58} (0,189) = 4,06 \text{ h}$$

Total waktu adalah  $2,63 + 4,06 = 6,69$  jam

**Contoh Soal 6.4. Pembuatan Kurva Pengeringan**

Bahan = Pasir Ottawa 80 – 100 mesh

Tebal Tumpukan = 1 in

Berat pasir kering = 27,125 lb

Luas muka = 2,35 ft

Tekanan steam = 50 psia

Buatlah kurva pengeringan untuk percobaan tersebut!

Waktu Pengeringan (Jam)	Cairan Total lb (L-Ls)
0.00	44.57
0.25	4.29
0.50	4.05
0.75	3.84
1.00	3.6
1.25	3.37
1.50	3.12
1.75	2.91
2.00	2.68
2.25	2.47
2.50	2.24
2.75	2.02
3.00	1.79
3.25	1.56
3.50	1.39
3.75	1.18
4.00	0.95
4.25	0.78
4.50	0.6
4.75	0.48
5.00	0.36
5.50	0.26
6.00	0.14
6.50	0.07
7.00	0.02
750	0

**Jawab:**

1. Menghitung  $X_t$

$$X_t = \frac{L - L_s}{L_s}$$

2. Menghitung kadar air rata-rata

$$x \text{ rata-rata} = \frac{X_{t1} + X_{t2}}{2}$$

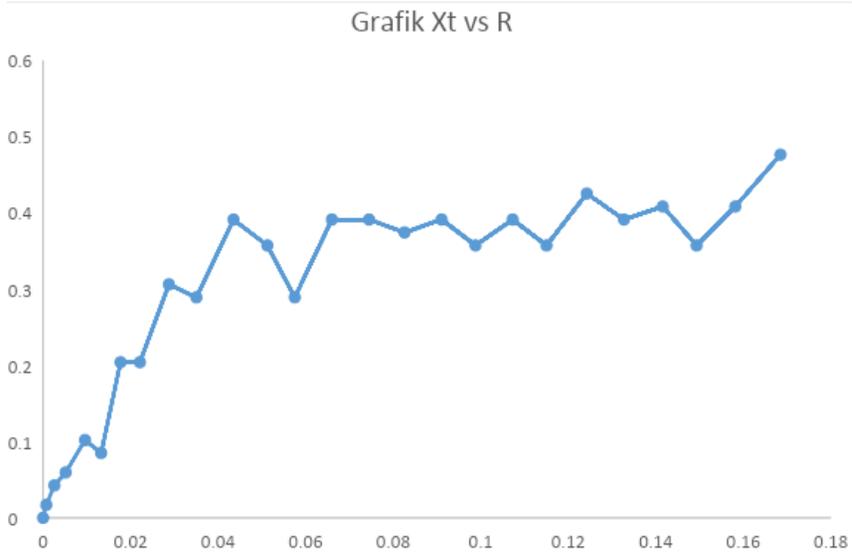
3. Menghitung banyak air yang hilang (m) per massa kering (Ls)

$$\text{delta } X = \text{cairan}_1 - \text{cairan}_2$$

4. Menghitung kecepatan pengeringan

$$R = \frac{m}{A \cdot \text{delta } t}$$

Waktu	Cairan total, lb (L-Ls)	Xt	X rata - rata	m	Delta t	R
0.00	4.57	0.168479	0.163317972	0.28	0.25	0.476596
0.25	4.29	0.158157	0.153732719	0.24	0.25	0.408511
0.50	4.05	0.149309	0.145437788	0.21	0.25	0.357447
0.75	3.84	0.141567	0.137142857	0.24	0.25	0.408511
1.00	3.6	0.132719	0.128479263	0.23	0.25	0.391489
1.25	3.37	0.12424	0.119631336	0.25	0.25	0.425532
1.50	3.12	0.115023	0.111152074	0.21	0.25	0.357447
1.75	2.91	0.107281	0.103041475	0.23	0.25	0.391489
2.00	2.68	0.098802	0.094930876	0.21	0.25	0.357447
2.25	2.47	0.082581	0.086820276	0.23	0.25	0.391489
2.50	2.24	0.082581	0.078525346	0.22	0.25	0.374468
2.75	2.02	0.07447	0.070230415	0.23	0.25	0.391489
3.00	1.79	0.065991	0.061751152	0.23	0.25	0.391489
3.25	1.56	0.057512	0.05437788	0.17	0.25	0.289362
3.50	1.39	0.051244	0.047373272	0.21	0.25	0.357447
3.75	1.18	0.043502	0.0392626	0.23	0.25	0.391489
4.00	0.95	0.035023	0.031889401	0.17	0.25	0.289362
4.25	0.78	0.028756	0.025437788	0.18	0.25	0.289362
4.50	0.6	0.02212	0.019907834	0.12	0.25	0.306383
4.75	0.48	0.017696	0.015483871	0.12	0.25	0.204255
5.00	0.36	0.013272	0.011428571	0.1	0.50	0.085106
5.50	0.26	0.009585	0.007373272	0.12	0.50	0.102128
6.00	0.14	0.005161	0.003870968	0.07	0.50	0.059574
6.50	0.07	0.002581	0.001658986	0.05	0.50	0.042553
7.00	0.02	0.000737	0.000368664	0.02	0.50	0.017021
7.50	0	0	0	0	0.50	0



### F. Waktu Pengerinan

$$R = \frac{-Ls \cdot dx}{A \cdot dt} ; t = \int_0^t dt = \frac{Ls}{A} \int_{x2}^{x1} \frac{dx}{R}$$

Periode kecepatan tetap:  $x1$  dan  $x2$  harganya lebih besar dari  $x_c$  dan  $R = R_c$

$$\text{Sehingga } t = \frac{Ls \cdot (x1 - x2)}{A \cdot R_c}$$

Periode kecepatan menurun:  $x1$  dan  $x2$  harganya lebih kecil dari  $x_c$ . Pengerinan berlangsung dengan  $R$  yang berubah-ubah.

Jika kecepatan menurun secara linier:  $R = mx + b$

Dengan  $m$  = kemiringan garis;  $b$  = konstanta, maka:

$$t = \frac{Ls}{A} \int_{x2}^{x1} \frac{dx}{mx+b} = \frac{Ls}{A} \ln \frac{mx1+b}{mx2+b}$$

Karena  $R1 = mx1 + b$ ;  $R2 = mx2 + b$ ;  $m = \frac{R1 - R2}{x1 - x2}$  maka:

$$t = \frac{Ls}{A} \frac{x1 - x2}{R1 - R2} \ln \frac{R1}{R2}$$

## Rangkuman Materi

1. Drying: Penghilangan sejumlah kecil air atau cairan dari suatu zat padat dengan jalan menguapkannya ke dalam suatu aliran gas.
2. Evaporasi: Penghilangan sejumlah besar air/cairan dari bahan, air/cairan dihilangkan dalam bentuk uap pada titik didihnya.
3. Suatu padatan basah jika kontak dengan udara dengan suhu dan kelembapan tetap, setelah lama akan diperoleh kandungan air dalam bahan mencapai keseimbangan. Kandungan air disebut kandungan air keseimbangan pada kelembapan suhu udara tertentu. Kandungan air dinyatakan dalam: kg air/kg bahan kering.
4. Air terikat diperoleh dari kurva pada kelembapan relative 100%, sedangkan kelebihan air yang ada disebut air yang tidak terikat.
5. Kandungan air bebas merupakan kandungan air di atas kandungan air kesetimbangan. Kandungan air bebas ini dapat dihilangkan dengan drying pada suhu dan kelembapan udara tertentu.
6. Ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam proses pengeringan: ukuran pengering yang diperlukan, kondisi (suhu dan kelembapan) udara yang digunakan, waktu pengeringan. Kecepatan, humidity, suhu, arah aliran udara sama dan konstan maka keadaan ini disebut kondisi pengeringan tetap. Kurva kecepatan pengeringan diperoleh dari drying secara batch pada pengeringan konstan/tetap.

**Latihan Soal**

1. Suatu zat padat akan dikeringkan dari kadar 20% menjadi 4% dengan kondisi pengeringan mengikuti kurva pengeringan pasir Ottawa pada contoh soal diatas. Zat padat mempunyai luas permukaan  $100 \text{ ft}^2$  dan berat keringnya 1 ton. Hitunglah waktu pengeringan totalnya!
2. Suatu padatan basah yang kurva laju pengeringannya diwakili oleh Gambar 9.1b harus dikeringkan dari kadar air bebas  $X_1 = 0,38 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$  padatan kering menjadi  $X_2 = 0,04 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$  padatan kering. Berat padatan kering adalah  $L_s = 399 \text{ kg}$  padatan kering dan  $A = 18,58 \text{ m}^2$  adalah permukaan pengeringan bagian atas. Hitung waktu pengeringan. Perhatikan bahwa  $L_s/A = 399/18,58 = 21,5 \text{ kg/m}^2$ .
3. Ulangi pertanyaan No. 2, tetapi sebagai perkiraan anggaplah garis lurus untuk grafik  $R$  versus  $X$  melalui titik asal dari titik  $X_c$  ke  $X = 0$  untuk periode falling-rate.



## Evaporasi (Penguapan)

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Mahasiswa dapat menjelaskan operasi evaporasi berikut dengan aplikasinya dalam industri.

Evaporasi didefinisikan sebagai proses penguapan sebagian pelarut sehingga didapatkan larutan dengan konsentrasi yang lebih pekat. Tujuan dari proses evaporasi adalah untuk memekatkan larutan yang terdiri dari zat terlarut yang tidak mudah menguap dan pelarut yang mudah menguap. Evaporasi berbeda dengan pengeringan, pada evaporasi sisa penguapan adalah zat cair, kadang zat cair yang sangat kental dan bukan zat padat. Proses evaporasi pun berbeda dengan distilasi karena dalam evaporasi biasanya komponen uapnya tunggal dan tidak dipisahkan menjadi fraksi-fraksi.

### A. Jenis Evaporasi Berdasarkan Kondisi

- Evaporasi Alami : proses penguapan yang terjadi secara alami.
- Evaporasi Paksaan: proses penguapan yang timbul akibat diberikan uap panas (steam) dalam suatu peralatan.

### B. Faktor yang Memengaruhi Proses Evaporasi

- *Temperature steam*: sebaiknya *temperature steam* disesuaikan dengan kondisi bahan yang akan dievaporasi. Bahan yang tidak tahan suhu tinggi tentunya akan membentuk kerak pada kolom evaporator sehingga akan mempengaruhi perpindahan panas dari steam ke bahan tersebut.
- **Tekanan operasi**: memengaruhi proses penguapan pelarut di samping *temperature*.
- **Laju alir umpan**: bila laju alir umpan terlalu kecil atau pun terlalu besar, proses akan kurang efisien. Dengan demikian, untuk suatu proses laju alir umpan, diusahakan adalah laju yang dapat menghasilkan proses yang optimal.
- **Sifat fisik dan kimia umpan.**
- **Luas permukaan kontak antara umpan dan media pemanas (panjang dan jumlah tube).**
- **Laju alir steam**
- **Laju air pendingin (kondensor)**

Evaporator merupakan alat yang berfungsi mengubah Sebagian atau keseluruhan pelarut dari larutan dari bentuk cair menjadi uap. Prinsip dasar evaporator ada 2, yakni untuk menukar panas dan untuk memisahkan uap yang terbentuk dari cairan. Bagian evaporator terdiri dari, bagian penukar panas, bagian evaporasi dan pemisah untuk memisahkan uap dari cairan lalu dimasukkan ke dalam kondensor atau peralatan lainnya.

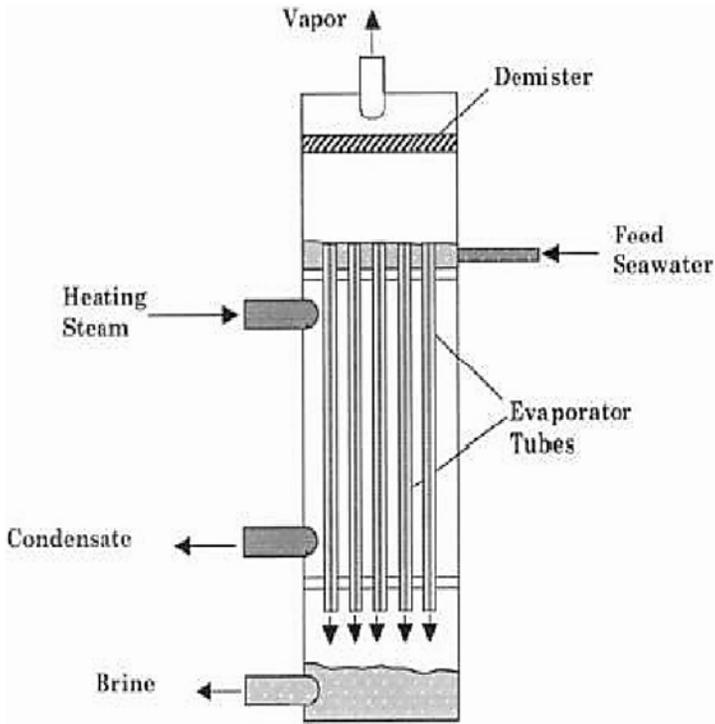
### C. Jenis Evaporator

#### 1. Evaporator Sirkulasi Alami/Paksa

Evaporator sirkulasi alami bekerja dengan memanfaatkan sirkulasi alami yang terjadi sebagai dampak perbedaan densitas terhadap pemanasan. Pada evaporator tabung, saat air mulai mendidih, maka buih air akan naik ke permukaan dan memulai sirkulasi yang mengakibatkan pemisahan liquid dan uap air di bagian atas dari tabung pemanas. Jumlah evaporasi bergantung dari perbedaan temperatur uap dengan larutan. Sering kali pendidihan mengakibatkan sistem kering. Untuk menghindari hal ini, dapat digunakan sirkulasi paksa, yaitu dengan menambahkan pompa untuk meningkatkan tekanan dan sirkulasi sehingga pendidihan tidak terjadi.

#### 2. *Falling Film Evaporator*

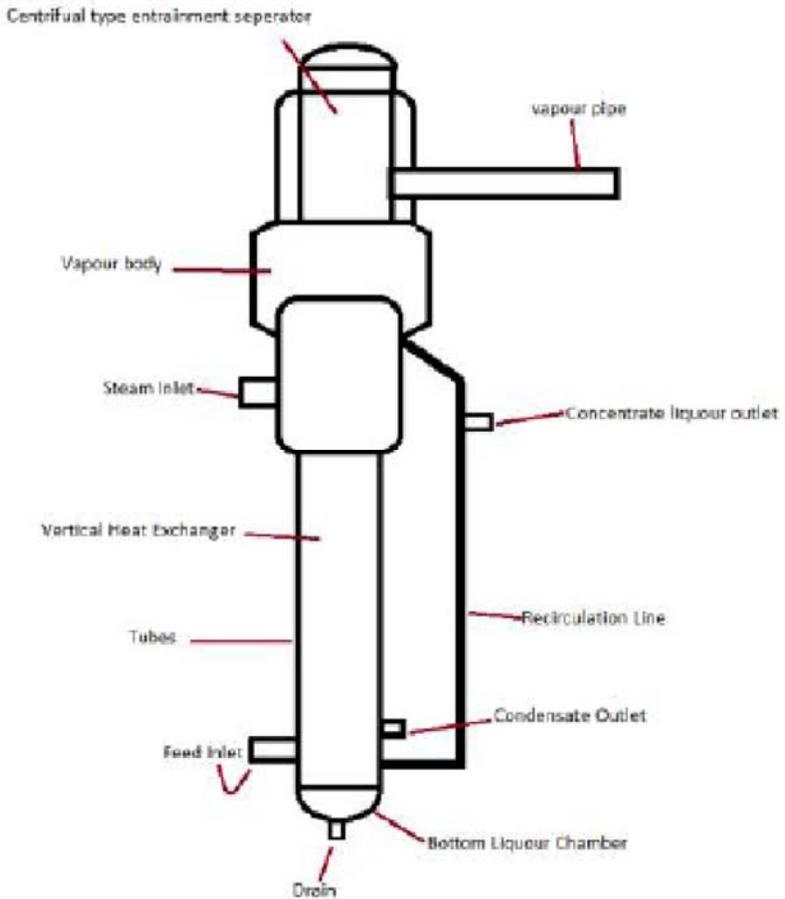
*Falling film evaporator* merupakan evaporator bentuk tabung panjang (4-8 meter) yang dilapisi dengan steam jaket. Larutan masuk dan arah larutan menurun sehingga memperoleh gaya gerak. Karakteristik medium pemanas dipengaruhi oleh kecepatan gerakan larutan. *Falling film evaporator* cocok untuk menangani larutan viskos sehingga sering digunakan untuk industri kimia, makanan, dan fermentasi.



Gambar 25.  
*Falling Film Evaporator*

### 3. *Rising Film (Long Tube Vertical) Evaporator*

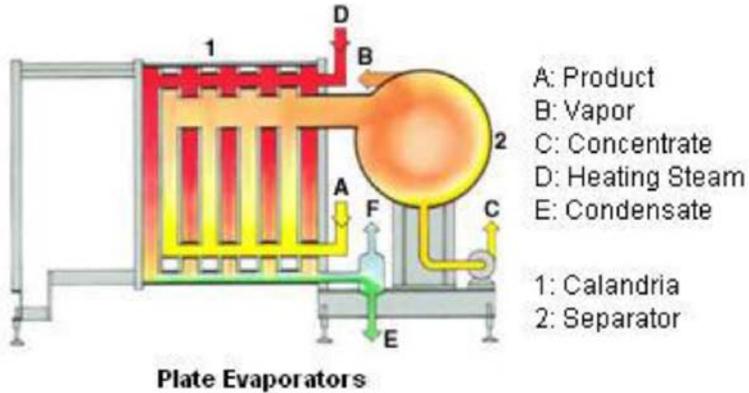
Pada evaporator tipe ini, pendidihan berlangsung di dalam tabung dengan sumber panas berasal dari luar tabung (biasanya uap). Buih air akan timbul dan menimbulkan sirkulasi.



Gambar 26.  
*Rising Film (Long Tube Vertical) Evaporator*

#### 4. *Plate Evaporator*

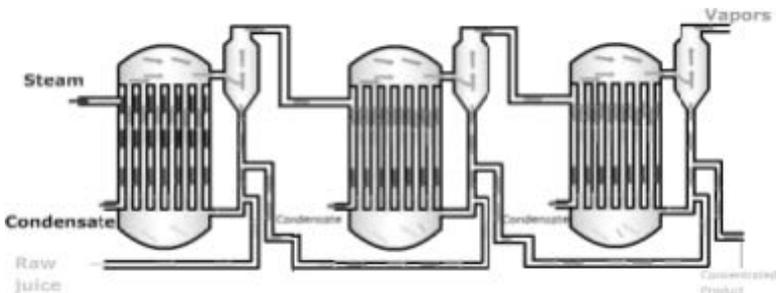
Mempunyai luas permukaan yang besar, Plate biasanya tidak rata dan ditopang oleh bingkai (frame). Uap mengalir melalui ruang-ruang di antara plate. Uap mengalir secara co-current dan counter current terhadap larutan. Larutan dan uap masuk ke separasi yang nantinya uap akan disalurkan ke condenser. Evaporator jenis ini sering dipakai pada industri susu dan fermentasi karena fleksibilitas ruangan. Tidak efektif untuk larutan kental dan padatan.



Gambar 27.  
*Plate Evaporator*

5. *Multi-effect Evaporator*

Menggunakan uap pada tahap untuk dipakai pada tahap berikutnya. Semakin banyak tahap, maka semakin rendah konsumsinya. Biasanya maksimal terdiri dari tujuh tahap. Bila lebih, sering kali ditemui biaya pembuatan melebihi penghematan energi. Ada dua tipe aliran, aliran maju ketika larutan masuk dari tahap paling panas ke yang lebih rendah, dan aliran mundur yang merupakan kebalikan dari aliran maju. Cocok untuk menangani produk yang sensitif terhadap panas seperti enzim dan protein.



Gambar 28.  
*Multi-effect Evaporator*

Jika cairan diuapkan di setiap 'effect' dan jika titik didih cairan tersebut tidak dipengaruhi oleh konsentrasi *solute*, maka Kesetimbangan panas

'effect' I

$$q_1 = U_1 A_1 (t_s - t_1) = U_1 A_1 \Delta t_1$$

$t_s$ : suhu *condensing steam* dari *boiler*

'effect' II

$$q_2 = U_2 A_2 (t_1 - t_2) = U_2 A_2 \Delta t_2$$

Jika semua evaporator bekerja setimbang, semua uap dari 'effect' I mengembun & menguapkan uap 'effect' II.

Jika kehilangan panas dapat diabaikan.

Jika tidak ada kenaikan titik didih larutan yang semakin pekat.

Jika *feed* dipasok pada titik didihnya, maka:

$$q_1 = q_2$$

$$\text{Jika } A_1 = A_2$$

$$U_2 / U_1 = \Delta t_1 / \Delta t_2$$

#### a. *Feeding of Multiple-Effect Evaporators*

Agar steam hasil penguapan 'effect' I dapat mendidihkan larutan pada 'effect' II. Agar suhu didih larutan pada 'effect' II lebih rendah maka 'effect' II harus pada keadaan tekanan yang lebih rendah. *Feed* akan mengalir dari 'effect' I ke 'effect' II dan seterusnya tanpa pemompaan (*Forward feed*) jika cairan paling pekat akan dihasilkan pada 'effect' terakhir. Sebaliknya untuk *Backward feed*, *feed* mengalir dengan arah berlawanan (menggunakan pemompaan).

#### b. Keuntungan *Multiple-Effect Evaporators*

Jika *single-effect evaporator* bekerja dengan tekanan yang sama dengan 'effect' I & semua kondisi sama, maka  $A_s$  untuk *single effect evaporation* yang akan menguapkan dalam jumlah yang sama de-

ngan 2 'effect'. Hal tersebut dapat dilihat pada penjabaran rumus berikut ini:

$$\Delta t_1 = \Delta t_2$$

$$\Delta t_s = \Delta t_1 + \Delta t_2 = 2\Delta t_1$$

$$\Delta t_1 = 0.5\Delta t_s$$

$$\begin{aligned} q_1 + q_2 &= U_1 A_1 \Delta t_1 + U_2 A_2 \Delta t_2 \\ &= U (A_1 + A_2) \Delta t_s / 2 \end{aligned}$$

$$q_1 + q_2 = q_s q_s = U A_s \Delta t_s$$

$$(A_1 + A_2) / 2 = 2 A_1 / 2 = A_s \quad A_1 = A_2 = A_s$$

(subscript 's' menunjuk pada single effect evaporation)

### Contoh Soal 7.1. *Multiple-effect Evaporator*

Hitung kebutuhan steam, luas permukaan pindah panas, dan suhu penguapan pada setiap 'effect' dari *triple effect evaporator* yang menguapkan 500 kg/jam 10% padatan menjadi 30% padatan. Steam berada pada 200 kPa gauge & tekanan di dalam *evaporation space* pada 'effect' terakhir 60 kPa absolute. Asumsi koefisien pindah panas keseluruhan 2270, 2000, & 1420 J m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> di 'effect' I, II, & III. Pengaruh panas sensibel diabaikan, tidak ada kenaikan titik didih, dan pindah panas di setiap 'effect' adalah sama.

**Jawab:**

$$q_1 = q_2 = q_3$$

$$U_1 A_1 \Delta T_1 = U_2 A_2 \Delta T_2 = U_3 A_3 \Delta T_3$$

$$\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 = (134 - 86) = 48^\circ\text{C}.$$

Jika  $A_1 = A_2 = A_3$  maka  $\Delta T_2 = U_1 \Delta T_1 / U_2$  dan  $\Delta T_3 = U_1 \Delta T_1 / U_3$

$$\Delta T_1 + (U_1 \Delta T_1 / U_2) + (U_1 \Delta T_1 / U_3) = 48^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_1 (1 + U_1/U_2 + U_1/U_3) = 48,$$

$$\Delta T_1 \times [1 + (2270/2000) + (2270/1420)] = 48$$

$$\Delta T_1 = 12,9^\circ\text{C},$$

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 \times (2270/2000) = 14,6^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_3 = \Delta T_1 \times (2270/1420) = 20,6^\circ\text{C}$$

Suhu evaporasi:

Effect I :  $134 - 12,9 = 121^\circ\text{C}$ ; panas laten (Tabel Steam)  $2200 \text{ kJ kg}^{-1}$

Effect II :  $121 - 14,6 = 106,5^\circ\text{C}$ ; panas laten  $2240 \text{ kJ kg}^{-1}$

Effect III:  $106,5 - 20,6 = 86^\circ\text{C}$ , panas laten  $2294 \text{ kJ kg}^{-1}$

Perubahan panas sensibel diabaikan,

Jika  $w_1, w_2, w_3$  = jumlah yang dievaporasi di effect I, II & III,  $w_s$  = jumlah steam terkondensasi per jam di Effect I,

$$\begin{aligned} w_1 \times 2200 \times 10^3 &= w_2 \times 2240 \times 10^3 \\ &= w_3 \times 2294 \times 10^3 \\ &= w_s \times 2164 \times 10^3 \end{aligned}$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 333$$

$$w_1 = 113 \text{ kg jam}^{-1}$$

$$w_2 = 111 \text{ kg jam}^{-1}$$

$$w_3 = 108 \text{ kg jam}^{-1}$$

$$w_s = 115 \text{ kg jam}^{-1}$$

### Konsumsi Steam

Dibutuhkan  $115 \text{ kg steam } (w_s)$  untuk menguapkan total  $333 \text{ kg air}$ :  $0.35 \text{ kg steam/kg air}$  menguap.

### Luas Permukaan Heat exchanger

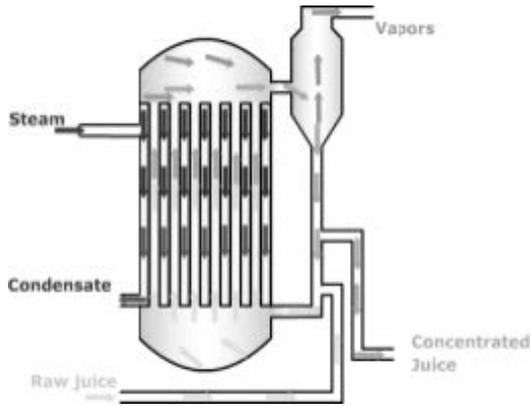
$$(113 \times 2200 \times 1000)/3600 = 2270 \times A_1 \times 12,9$$

$$A_1 = 2,4 \text{ m}^2 = A_2 = A_3$$

$$\text{total area} = A_1 + A_2 + A_3 = 7,2 \text{ m}^2.$$

## 6. *Single-effect Evaporator*

Yang dimaksud dengan single effect adalah bahwa produk hanya melalui satu buah ruang penguapan dan panas diberikan oleh satu luas permukaan pindah panas.



Gambar 29.  
Single-effect Evaporator

**Contoh Soal 7.2. Single-effect Evaporator**

Single effect evaporator menguapkan larutan 10% padatan menjadi 30% padatan dengan laju 250 kg *feed* per jam. Tekanan dalam evaporator 77 kPa absolute, & steam tersedia dengan tekanan 200 kPa gauge. Hitung jumlah steam yang dibutuhkan per jam & luas area permukaan pindah panas!

Diketahui: Koefisien pindah panas overall  $1700 \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Asumsi: suhu feed 18 °C, titik didih larutan pada 77 kPa absolute = 91°C, panas spesifik larutan = air =  $4,186 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$ , panas laten penguapan = air pada kondisi yang sama.

**Jawab:**

Banyaknya steam yg diperlukan/jam (kg steam/jam) = panas yang dibutuhkan (J/jam) Panas yang tersedia (steam). Panas yang tersedia (steam) = panas laten + panas sensibel untuk mendinginkan ke 91°C. Panas yang dibutuhkan larutan (dalam evaporator) = panas laten + panas sensibel untuk memanaskan ke 91 °C. Panas laten steam (yang tersedia) & panas laten dalam evaporator (yang dibutuhkan)?

Lihat *steam table* (Earle, Appendix 8)

## APPENDIX 8

## STEAM TABLE - SATURATED STEAM

Temperature (°C)	Pressure(Absolute) (kPa)	Enthalpy (sat. vap.) (kJ kg <sup>-1</sup> )	Latent heat (kJ kg <sup>-1</sup> )	Specific volume (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )
0	0.611	2501	2501	206
1	0.66	2503	2499	193
2	0.71	2505	2497	180
4	0.81	2509	2492	167
6	0.93	2512	2487	158
8	1.07	2516	2483	151
80	47.4	2644	2309	3.41
90	70.1	2660	2283	2.36
100	101.4	2676	2257	1.67
15	1.82	2531	2464	73.3
18	2.06	2534	2459	65.0
20	2.34	2538	2454	57.8
125	232.1	2714	2189	0.771

Steam

$$P = 200 \text{ kPa (g)} \quad T = ? \quad \text{Panas laten} = ?$$

Evaporator

$$P = 77 \text{ kPa (abs)} \quad T = 91^\circ\text{C} \quad \text{Panas laten} = ?$$

$$P \text{ steam (abs)} = P \text{ relatif} + P \text{ udara} = 200 \text{ kPa} + 101 \text{ kPa} = 301 \text{ kPa}$$

Steam

$$P = 200 \text{ kPa (g)} \quad T = 134^\circ\text{C}$$

$$\text{Panas laten} = 2164 \text{ kJ/kg}$$

Evaporator

$$P = 77 \text{ kPa (abs)} \quad T = 91^\circ\text{C}$$

$$\text{Panas laten} = 2281 \text{ kJ/kg}$$

Panas yang tersedia (steam)

$$= \text{panas laten} + \text{panas sensibel}$$

$$= 2,164 \times 10^6 + 4,186 \times 10^3(134 - 91)$$

$$= 2,34 \cdot 10^6 \text{ J/kg steam}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Panas yang dibutuhkan larutan (evaporator)} \\
 & = \text{panas laten} + \text{panas sensibel} \\
 & = 2281 \times 10^3 \times m_e + m_f \times 4,186 \times 10^3 \times (91 - 18) \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Mass Balance (kg/jam)

	Solid	Liquid	Total
Feed	25	225	250
Product	25	58	83
Evaporation			167

$$\begin{aligned}
 & \text{Panas yang dibutuhkan larutan (evaporator)} \\
 & = \text{panas laten} + \text{panas sensibel} \\
 & = 2281 \times 10^3 \times 167 + 250 \times 4,186 \times 10^3 \times (91 - 18) \text{ } ^\circ\text{C} = 4,57 \\
 & \quad \cdot 10^8 \text{ J/jam}
 \end{aligned}$$

Banyaknya steam yang diperlukan/jam (kg steam/jam)

$$\begin{aligned}
 & = \frac{\text{panas yang dibutuhkan } \left(\frac{\text{J}}{\text{jam}}\right)}{\text{panas yang tersedia (steam)}} \\
 & = 195 \text{ kg steam/jam} \\
 & \text{Banyaknya steam untuk menguapkan 1 kg air} = 195/167 = 1,17 \\
 & \text{kg steam/kg air}
 \end{aligned}$$

Luas permukaan perpindahan panas  $q = U \cdot A \cdot \Delta T$

$$A = 1,02 \text{ m}^2$$

## Rangkuman Materi

1. Evaporasi didefinisikan sebagai proses penguapan sebagian pelarut sehingga didapatkan larutan dengan konsentrasi yang lebih pekat. Tujuan proses evaporasi adalah untuk memekatkan larutan yang terdiri dari zat terlarut yang tidak mudah menguap dan pelarut yang mudah menguap.
2. Evaporasi Alami, merupakan proses evaporasi yang terjadi secara alami.
3. Evaporasi Paksaan, merupakan proses evaporasi yang timbul karena diberikan uap panas (steam) dalam suatu alat.
4. Evaporator merupakan alat yang berfungsi mengubah sebagian atau seluruh pelarut dalam larutan dari bentuk cair menjadi uap.
5. Evaporator memiliki dua prinsip dasar yakni, menukar panas dan memisahkan uap dari cairan.
6. Evaporator terdiri dari tiga bagian, yaitu penukar panas, bagian penguapan, dan pemisah uap dari cairan yang kemudian dimasukkan ke dalam kondensor.
7. Evaporator sirkulasi alami bekerja secara alami memanfaatkan perbedaan densitas yang terjadi akibat pemanasan.
8. Evaporator Falling Film memiliki bentuk tabung panjang dengan panjang 4-8 meter yang dilapisi dengan steam jacket.
9. Evaporator rising film memiliki mekanisme pendidihan yang berlangsung di dalam tabung dengan sumber panas dari luar tabung.
10. Plate evaporator umumnya dipakai pada industri susu dan fermentasi karena fleksibel. Tidak efektif untuk larutan kental dan padatan.
11. Prinsip kerja multi effect evaporator adalah menggunakan uap keluaran pada tahap sebelumnya untuk dipakai sebagai umpan di tahap selanjutnya.
12. Single effect evaporator merupakan evaporator dengan satu buah ruang penguapan serta satu luas permukaan pindah panas.

## Latihan Soal

1. Jus tomat dipekatkan dari 12% padatan menjadi 28% padatan dalam *climbing film evaporator*, tinggi 3m & diameter 4cm. Suhu maksimum jus tomat 57°C. Jus dimasukkan ke evaporator pada suhu 57°C dan pada suhu ini panas laten penguapan 2366 KJ.kg<sup>-1</sup>. Steam digunakan di 'jaket' evaporator pada tekanan 170 kPa (absolut). Jika koefisien pindah panas keseluruhan 6000 J m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>, hitung jumlah jus tomat yang dimasukkan per jam.
2. Single-effect evaporator kontinu berkonsentrasi 9072 kg/jam larutan garam 1,0% berat yang masuk pada 311 K (37,8 °C) hingga konsentrasi akhir 1,5% berat. Ruang uap evaporator berada pada 101.325 kPa (1,0 atm abs) dan steam yang disuplai jenuh pada 143,3 kPa. Koefisien keseluruhan  $U = 1704 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Hitung jumlah produk uap dan cairan serta luas perpindahan panas yang diperlukan. Asumsikan, karena larutan bersifat encer maka larutan memiliki titik didih yang sama dengan air.
3. Triple-effect evaporator sirkulasi-paksa menggunakan feed forward akan digunakan untuk memekatkan larutan NaOH 10% berat yang masuk pada suhu 37,8°C sampai konsentrasi 50%. Steam yang digunakan masuk pada ukuran 58,6 kPa. Tekanan absolut di ruang uap efek ketiga adalah 6,76 kPa. Kecepatan feed adalah 13.608 kg/jam. Koefisien perpindahan panas adalah  $U_1 = 6246$ ,  $U_2 = 3407$  dan  $U_3 = 2271 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Semua efek memiliki luas area yang sama. Hitung luas permukaan dan konsumsi uap.

## Kristalisasi

### TUJUAN PEMBELAJARAN

Mahasiswa dapat menjelaskan operasi kristalisasi berikut dengan aplikasinya dalam industri.

Kristalisasi merupakan proses pembentukan kristal padat dari suatu zat terlarut pada larutan. Komponen zat terlarut dipisahkan dengan mekanisme membuat kondisi larutan menjadi lewat jenuh. Contoh: produksi sukrosa dari bit gula. Komponen terlarut dipisahkan dari larutan dengan membuat suatu kondisi sehingga larutan menjadi lewat jenuh/supersaturated, sehingga zat terlarut mengkristal. Kristalisasi hanya dapat terjadi pada larutan supersaturated. Fase cair yang tersisa setelah pembentukan Kristal disebut “mother liquor/larutan induk”.

### A. Larutan Lewat Jenuh (*Supersaturated*)

Suatu larutan dapat dibuat menjadi lewat jenuh/*supersaturated* dengan beberapa cara, di antaranya:

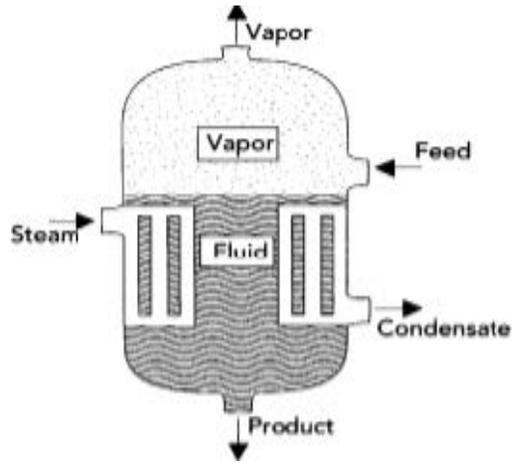
- Penghilangan pelarut dengan evaporasi, membran separasi, atau *freeze concentration*.
- Pendinginan larutan (kelarutan menurun dengan penurunan temperatur)

### B. Pemekatan Liquid

Proses pemekatan dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu:

#### 1. Pemekatan dengan Evaporasi

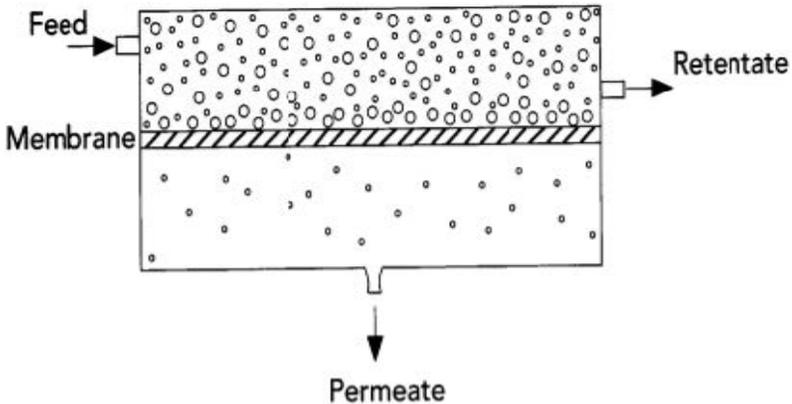
Evaporasi adalah proses penghilangan air dengan proses pemanasan/pendidihan. Pemekatan dengan metode ini sudah dilakukan pada beberapa proses pengolahan, yaitu: konsentrat jeruk, pasta tomat, dan susu kondensasi. Evaporasi juga digunakan untuk memekatkan garam dan gula sebelum proses refining.



Gambar 30.  
*Evaporator*

## 2. Pemekatan dengan Membran Separasi (*Membrane Separation*)

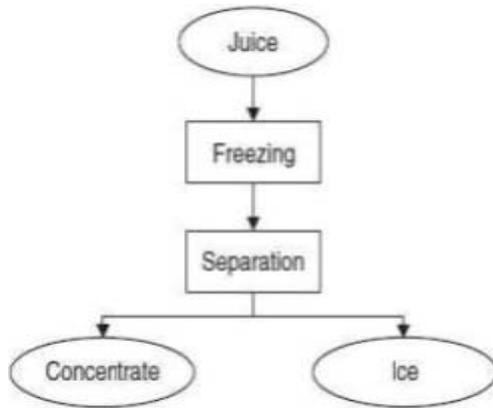
Prinsip kerja pemisahan dengan menggunakan membrane yakni perbedaan permeabilitas membrane semipermeable terhadap ukuran molekul yang berbeda. Molekul berukuran lebih kecil akan melewati membrane dengan mudah daripada yang berukuran yang lebih besar.



Gambar 31.  
Skema Membran Separasi

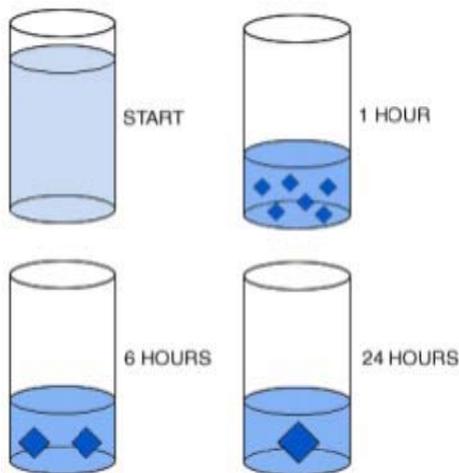
### 3. Pemekatan dengan Pembekuan (*Freeze Concentration*)

Mekanisme pemekatan dengan pembekuan terjadi ketika sebagian air dibekukan menjadi kristal es untuk membuat konsentrat. Kemudian, kristal es akan dipisahkan dengan mekanisme selanjutnya yakni sentrifugasi. Aplikasi pemekatan dengan pembekuan sudah banyak dilakukan pada jus buah, kopi, dan teh. Bahan pangan berkualitas lebih baik (karena tidak ada aplikasi panas).



Gambar 32.  
Skema Pemekatan dengan Pembekuan

### C. Tahapan Kristalisasi

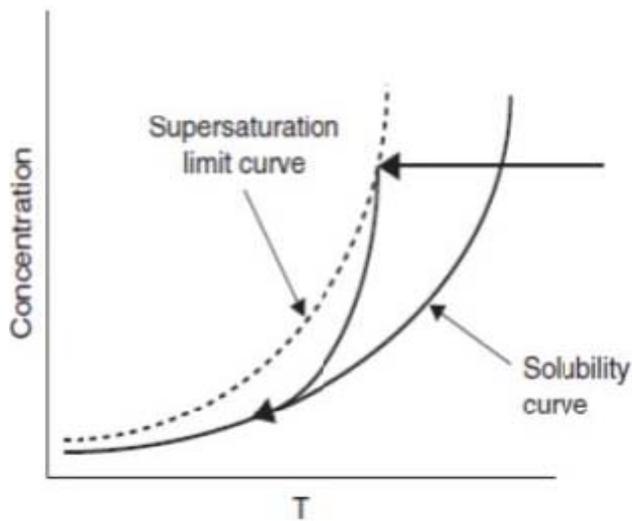


Gambar 33.  
Skema Tahapan Kristalisasi

## 1. *Nucleation*/ Nukleasi

Ketika suatu larutan terdiri dari zat terlarut murni dan pelarut murni, maka kejenuhan didefinisikan sebagai konsentrasi maksimum zat terlarut dapat larut dengan pelarut pada suhu dan tekanan tertentu. Jika larutan jenuh didinginkan perlahan maka zat terlarut masih tinggal di dalam larutan. Larutan tersebut kemudian dikatakan lewat jenuh/supersaturated.

Semakin tinggi tingkat kejenuhan maka zat terlarut akan berkumpul membuat agregat dalam suatu kluster. Apabila tingkat kejenuhan rendah maka kluster yang terbentuk kecil dan tidak stabil. Namun, jika tingkat kejenuhan tinggi, maka kluster akan stabil dan cukup besar untuk membentuk kristal. Sehingga kondisi itulah yang disebut nuclei, yakni partikel padat yang tumbuh menjadi kristal.



Gambar 34.  
Kurva Kristalisasi

## 2. *Crystal Growth*/ Pertumbuhan Kristal

Kristal tumbuh disekitar nuclei/inti sebagai akibat dari pengendapan zat terlarut dari larutan jenuh.

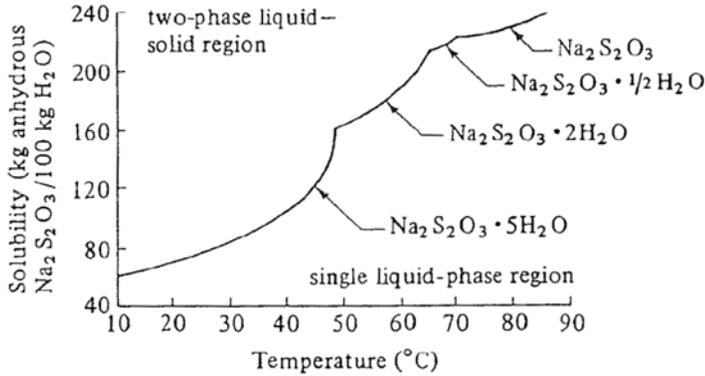


Gambar 35.  
Pertumbuhan Kristal

## 3. Kelarutan Kristal

Campuran antara kristal dan mother liquor disebut dengan “magma”. Magma mengandung kristal dengan berbagai ukuran. Kristal yang kecil memiliki specific surface yang lebih besar dibandingkan kristal yang berukuran besar. Sehingga kristal yang sangat kecil lebih terlarut dan dapat dalam kondisi keseimbangan dengan mother liquor.

Dalam kristalisasi, keseimbangan tercapai ketika larutan atau larutan induk jenuh. Kelarutan dalam proses kristalisasi tergantung terutama pada suhu. Sedangkan pengaruh tekanan terhadap kelarutan dapat diabaikan. Data kelarutan diberikan dalam bentuk kurva, dengan kelarutan dalam beberapa senyawa diplot terhadap suhu. Tabel kelarutan dapat diketahui dalam banyak *chemical handbooks*.



Gambar 36.

Grafik Kelarutan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  dalam Air

Gambar di atas menunjukkan kurva kelarutan untuk natrium tiosulfat,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ . Kelarutan meningkat dengan cepat dengan suhu, tetapi ada jeda tertentu pada kurva yang menunjukkan hidrat yang berbeda. Fase stabil hingga  $48,2^\circ\text{C}$  adalah pentahidrat  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . Ini berarti bahwa pada konsentrasi di atas garis kelarutan (hingga  $48,2^\circ\text{C}$ ), kristal padat yang terbentuk adalah  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . Sedangkan pada suhu  $48,2^\circ\text{C}$  sampai  $65^\circ\text{C}$ , fase stabil adalah  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Sedangkan untuk setengah hidrat hadir antara  $65^\circ\text{C}$  hingga  $70^\circ\text{C}$ , dan garam anhidrat adalah fase stabil pada suhu di atas  $70^\circ\text{C}$ .

Tingkat kelarutan kristal yang berukuran kecil berhubungan dengan ukurannya sesuai persamaan Kelvin:

$$\ln \beta = \frac{4 \cdot V \cdot \phi}{n \cdot R \cdot T \cdot L}$$

$\beta$  = konsentrasi larutan

$\phi$  = Tegangan permukaan antara larutan dan senyawa terlarut

V = Volume molar senyawa terlarut

R = Konstanta gas ( $8,314 \text{ J/mol.K}$ )

T = Suhu (kelvin)

L = Ukuran partikel

N = Jumlah ion per molekul ( $n=1$  jika senyawa tidak terdisosiasi, misalnya gula)

**Contoh Soal 8.1 Ukuran Kristal**

Berapa ukuran nuclei Kristal sukrosa dalam keseimbangan dengan mother liquor pada kondisi superjenuh 115% pada suhu 20°C dengan tegangan permukaan antara kristal sukrosa dan larutan sebesar 0,003 J/m<sup>2</sup>. Densitas kristal sukrosa sebesar 1600 kg/m<sup>3</sup>. Berat molekul sukrosa = 342

**Jawab:**

$$V = \frac{M}{P} = \frac{342}{1600} = 0,00021375 \text{ m}^3/\text{mol}$$

$$R = 8,314 \text{ J/K.mol}$$

Untuk sukrosa,  $n = 1$ ,

$$\ln \beta = \frac{4 \cdot V \cdot \phi}{n \cdot R \cdot T \cdot L}$$

$$\ln 1,15 = 0,1398 = \frac{4 \times 0,00021375 \times 0,003}{1 \times 8,314 \times 293 \times L}$$

$$L = 7,5 \times 10^{-9} \text{ m} = 7,5 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}$$

**D. Yield dan Material Balance Kristalisasi**

Dalam sebagian besar proses kristalisasi industri, larutan (larutan induk) dan kristal padat berkontak untuk waktu yang cukup lama untuk mencapai kesetimbangan. Oleh karena itu, larutan induk akan jenuh pada suhu akhir proses, dan konsentrasi akhir zat terlarut dalam larutan dapat diperoleh dari kurva kelarutan. Hasil kristal dari proses kristalisasi kemudian dapat dihitung dengan mengetahui konsentrasi awal zat terlarut, suhu akhir, dan kelarutan pada suhu ini. Dalam beberapa kasus dalam kristalisasi komersial, laju pertumbuhan kristal mungkin cukup lambat, karena larutan yang sangat kental atau luas permukaan bidang kontak antara kristal dengan larutan yang kecil. Sehingga memberikan hasil kristal yang lebih rendah dari yang diperkirakan.

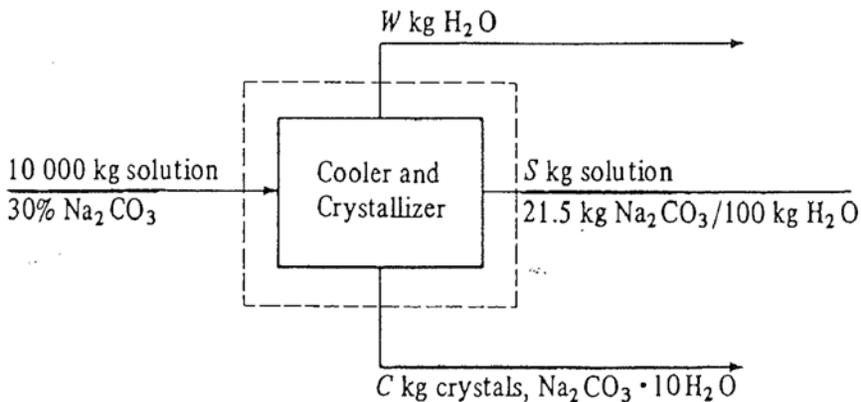
Dalam sebagian besar proses kristalisasi industri, larutan (larutan induk) dan kristal padat berkontak untuk waktu yang cukup lama untuk mencapai kesetimbangan. Oleh karena itu, larutan induk akan jenuh pa-

da suhu akhir proses, dan konsentrasi akhir zat terlarut dalam larutan dapat diperoleh dari kurva kelarutan. Hasil kristal dari proses kristalisasi kemudian dapat dihitung dengan mengetahui konsentrasi awal zat terlarut, suhu akhir, dan kelarutan pada suhu ini. Dalam beberapa kasus dalam kristalisasi komersial, laju pertumbuhan kristal mungkin cukup lambat, karena larutan yang sangat kental atau luas permukaan bidang kontak antara kristal dengan larutan yang kecil. Sehingga memberikan hasil kristal yang lebih rendah dari yang diperkirakan.

### Contoh Soal 8.2 Yield Proses Kristalisasi

Larutan garam dengan berat 10.000 kg dengan 30% berat  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  didinginkan hingga 293 K ( $20^\circ\text{C}$ ). Garam mengkristal sebagai decahydrate. Berapa hasil kristal  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  jika kelarutannya adalah 21,5 kg  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  anhidrat/100 kg total air? Hitunglah hasil kristal untuk kasus-kasus berikut:

- Asumsikan tidak ada air yang diuapkan
- Asumsikan bahwa 3% dari total berat larutan hilang oleh penguapan air dalam pendingin



**Jawab:**

Berat molekul adalah 106 untuk  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 180,2 untuk  $10\text{H}_2\text{O}$  dan 286,2 untuk  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . Diagram alir proses ditunjukkan pada Gambar di atas, dengan W merupakan kg  $\text{H}_2\text{O}$  yang diuapkan, larutan S kg merupakan larutan induk, dan kristal C kg  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . Membuat neraca massa air di sekitar kotak garis putus-putus untuk bagian (a), dengan  $W = 0$ ,

$$0,70(10.000) = \frac{100}{100+21,5}(S) + \frac{180,2}{286,2}(C) + 0 \quad (1)$$

dengan  $(180,2)/(286,2)$  adalah sebagian kecil air dalam kristal. Kemudian membuat neraca massa  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , Dari dua persamaan tersebut didapatkan hasil,  $C = 6370$  kg kristal  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  dan  $S = 3630$  kg larutan. Untuk bagian (b),  $W = 0,03(10.000) = 300$  kg  $\text{H}_2\text{O}$ . Persamaan menjadi

$$0,70(10.000) = \frac{100}{100+21,5}(S) + \frac{180,2}{286,2}(C) + 300 \quad (2)$$

Persamaan di atas tidak berubah karena tidak ada garam di aliran W. Kemudian menyelesaikan Persamaan (1) dan (2) secara bersamaan sehingga didapatkan hasil,  $C = 6630$  kg kristal  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  dan  $S = 3070$  kg larutan.

**E. Keseimbangan Panas Kristalisasi**

Panas pelarutan merupakan peristiwa penyerapan panas pada larutan sehingga kelarutan akan meningkat Ketika suhu meningkat. Evolusi panas terjadi ketika suatu senyawa kelarutannya tidak berubah dengan perubahan suhu, sehingga tidak ada evolusi panas pada pelarutan. Sebagian besar data tentang panas pelarutan diberikan sebagai perubahan entalpi dalam  $\text{kJ/kg mol}$  ( $\text{kcal/g mol}$ ) zat terlarut yang terjadi dengan pelarutan 1 kg mol zat padat dalam sejumlah besar pelarut. Pada kondisi keseimbangan, panas kristalisasi akan sama dengan negatif panas pelarutan pada konsentrasi yang sama dalam larutan. Jika panas pengenceran dari satura-

si dalam larutan kecil, maka panas pengenceran ini dapat diabaikan, dan negatif dari panas larutan pada pengenceran dapat digunakan sebagai panas kristalisasi.

Dalam banyak senyawa, panas pengenceran ini kecil dibandingkan dengan panas pelarutan, dan asumsi ini cukup akurat untuk digunakan. Data panas pelarutan tersedia dalam beberapa buku referensi (P1, N1). Metode yang paling sering digunakan untuk menghitung efek panas selama proses kristalisasi adalah dengan menggunakan grafik konsentrasi vs entalpi untuk larutan dari berbagai fase padat yang ada untuk sistem. Namun, hanya beberapa grafik yang tersedia, termasuk sistem berikut: kalsium klorida - air (H1), magnesium sulfat - air (P2), dan ferro sulfat - air (K2). Ketika grafik tersebut tersedia, prosedur berikut ini dapat digunakan.

Entalpi H1 dari larutan masuk pada suhu awal dibaca dari grafik, yaitu H1 adalah kJ (btu) untuk total umpan. Entalpi H2 dari campuran akhir kristal dan larutan induk pada suhu akhir juga dibaca dari grafik. Jika beberapa penguapan terjadi, entalpi H<sub>v</sub> uap air diperoleh dari tabel uap. Maka total panas yang diserap q dalam kJ adalah

$$q = (H_2 + H_v) - H_1 \quad (3)$$

Jika q positif, panas harus ditambahkan ke sistem. Jika negatif, panas harus dikeluarkan dari sistem.

### Contoh Soal 8.3 Keseimbangan Panas dalam Kristalisasi

Larutan umpan 2268 kg pada 327,6 K (54,4°C) yang mengandung 48,2 kg MgSO<sub>4</sub>/100 kg total air didinginkan hingga 293,2 K (20°C), ketika kristal MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O dihilangkan. Kelarutan garam adalah 35,5 kg MgSO<sub>4</sub>/100 kg total air (P1). Kapasitas panas rata-rata dari larutan umpan dapat diasumsikan 2,93 kJ/kg·K (H1). Panas pelarutan pada 291,2 K (18°C) adalah -13,31 x 10<sup>3</sup> kJ/kg mol MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O (P1). Hitung hasil kristal dan buatlah neraca panas untuk menentukan total panas yang diserap, q, dengan asumsi bahwa tidak ada air yang diuapkan.

**Jawab:**

Membuat neraca massa air dan neraca massa  $\text{MgSO}_4$  menggunakan persamaan yang mirip dengan (1) dan (2) dalam contoh 11.1, sehingga didapatkan hasil  $C = 616.9$  kg kristal  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  dan larutan  $S = 1651.1$  kg. Untuk membuat neraca panas, datum  $293,2$  K ( $20^\circ\text{C}$ ) akan digunakan. Berat molekul  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  adalah  $246,49$ . Entalpi feed adalah  $H_1$ ,

$$H_1 = 2268 \cdot (2,93) \cdot (327,6 - 293,2)C = 228,600 \text{ kJ}$$

Panas pelarutannya adalah  $-(13,31 \times 10^3) / 246,49 = -54$  kJ/kg kristal. Maka panas kristalisasi adalah  $-(-54) = +54$  kJ/kg kristal, atau  $54(616,9) = 33,312$  kJ. Ini mengasumsikan bahwa nilai panas pelarutan pada  $291,2$  K sama dengan pada  $293,2$  K. Dan nilai  $H_v = 0$  karena tidak ada panas penguapan. Sehingga, total panas yang diserap,  $q$ , adalah

$$Q = -33.312 - 228.600 = -261.912 \text{ kJ } (-248.240 \text{ btu})$$

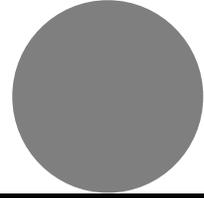
Oleh karena  $q$  negatif, maka panas harus dilepaskan dari sistem.

## Rangkuman Materi

1. Kristalisasi merupakan proses ketika kristal padat terbentuk pada suatu larutan. Komponen zat terlarut dipisahkan dari larutan dengan membuat kondisi larutan menjadi jenuh.
2. Pemekatan dengan metode evaporasi pun dilakukan pada beberapa proses pengolahan, yakni: konsentrat jeruk, pasta tomat, dan susu kondensasi. Proses evaporasi juga digunakan pada proses pemekatan garam dan gula sebelum proses refining.
3. Prinsip pemisahan dengan membrane adalah perbedaan permeabilitas membrane semipermeable terhadap ukuran molekul yang berbeda. Molekul dengan ukuran kecil akan lolos melewati membrane sedangkan molekul dengan ukuran besar akan tertahan.
4. Sebagian air akan dibekukan menjadi kristal es saat membuat suatu konsentrat. Selanjutnya kristal es akan dipisahkan dengan proses sentrifugasi.
5. Hasil kristal dari proses kristalisasi kemudian dapat dihitung dengan mengetahui konsentrasi awal zat terlarut, suhu akhir, dan kelarutan pada suhu ini. Pada beberapa kasus dalam kristalisasi komersial, laju pertumbuhan kristal mungkin cukup lambat, karena larutan yang sangat kental atau luas permukaan bidang kontak antara kristal dengan larutan yang kecil, sehingga memberikan hasil kristal yang lebih rendah dari yang diperkirakan.
6. Suatu senyawa yang kelarutannya akan meningkat ketika suhu meningkat, karena terjadi penyerapan panas, yang disebut panas pelarutan. Evolusi panas terjadi ketika suatu senyawa kelarutannya tidak berubah dengan perubahan suhu, sehingga tidak ada evolusi panas pada pelarutan.
7. Pada kondisi kesetimbangan, panas kristalisasi akan sama dengan negatif panas pelarutan pada konsentrasi yang sama dalam larutan. Jika panas pengenceran dari saturasi dalam larutan kecil, maka panas pengenceran ini dapat diabaikan, dan negatif dari panas larutan pada pengenceran dapat digunakan sebagai panas kristalisasi.

## Latihan Soal

1. Gunakan kondisi operasi yang diberikan dalam Contoh 11.2, tetapi larutan didinginkan hingga 283,2 K, yang kelarutannya adalah 30,9 kg  $\text{MgSO}_4/100$  kg air total (P1). Hitung pengaruhnya terhadap rendemen dan panas yang diserap dengan menggunakan 283,2 K untuk kristalisasi.
2. Larutan panas yang mengandung 1000 kg  $\text{MgSO}_4$  dan air dengan konsentrasi 30 wt%  $\text{MgSO}_4$  didinginkan hingga 288,8 K, yang kristal  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  diendapkan. Kelarutan pada 288,8 K adalah 24,5 wt%  $\text{MgSO}_4$  anhidrat dalam larutan. Hitung hasil kristal yang diperoleh jika 5% air dalam sistem menguap saat pendinginan.
3. Larutan umpan 10.000 lbm pada 130 F yang mengandung 47,0 lb  $\text{FeSO}_4/100$  lb total air didinginkan hingga 80 F, yang kristal  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  dihilangkan. Kelarutan garam adalah 30,5 lb  $\text{FeSO}_4/100$  lb total air (P1). Kapasitas panas rata-rata larutan umpan adalah 0,70 btu/lbm. F. Kalor larutan pada suhu 18 C adalah -4,4 kkal/g.mol (-18,4 kJ/gmol)  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (P1). Hitung hasil kristal dan buat keseimbangan panas. Asumsikan tidak ada air yang menguap.



---

## Daftar Pustaka

- Brown, G.G., Katz, D., Foust, A.S., and Scheneidewind, R., 1973, Unit Operations, John Willey and Sons, Inc., New York.
- Coulson and Richardson, Chemical Engineering Vol 6, Pergamon Press
- Foust, A.S., 2008, Principles of Unit Operations 2<sup>nd</sup> edition, John Willey and Sons, Inc., New York.
- Geankoplis, Transport Processes dan Separation Process, 4th edition, Pearson
- McCabe, W.L., et al., 2005, Unit Operations of Chemical Engineering 7<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill Higher Education, New York.
- Schweitzer, P.A., 1997, Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineering, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill Book Co, New York.
- Welty, J.R., Wicks, C.E., and Wilson, R.E., 2014, Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer 6<sup>th</sup> edition, John Willey and Sons, Inc., New York.



**RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER**  
**MATA KULIAH INTI**  
**(RPS MK INTI)**

**A. Identitas**

- |                           |                                       |
|---------------------------|---------------------------------------|
| 1. Program Studi          | : Teknik Kimia                        |
| 2. Fakultas               | : Fakultas Teknologi Industri         |
| 3. Nama Matakuliah        | : Operasi Perpindahan Massa dan Panas |
| 4. Kode                   | : 2045330                             |
| 5. Bobot (Teori/ Praktek) | : 3 sks (teori)                       |
| 6. Semester               | : 4 (empat)                           |
| 7. Rumpun Mata Kuliah     | : Ilmu Teknik dan Perancangan         |
| 8. Alokasi waktu total    | : 14 x 100'/pertemuan                 |

## B. Capaian Pembelajaran Mata Kuliah

1. Mahasiswa menunjukkan sikap bertanggung jawab atas pekerjaan di bidang keahlian teknik kimia terkait proses perpindahan massa dan panas secara mandiri (STN 10)
2. Mahasiswa menguasai konsep teoritis perpindahan massa dan panas, prinsip-prinsip rekayasa (*engineering principles*), perancangan rekayasa proses yang diperlukan untuk analisis dan perancangan proses yang berhubungan dengan konsep perpindahan massa dan panas (PP1)
3. Mahasiswa menguasai prinsip dan teknik perancangan proses, sistem proses, dan peralatan yang diperlukan untuk mengubah bahan baku menjadi produk yang mempunyai nilai tambah sesuai dengan tinjauan proses perpindahan massa dan panas (PP2)
4. Mahasiswa menerapkan pemikiran logis, kritis, sistematis, dan inovatif dalam konteks pengembangan atau implementasi konsep proses perpindahan massa dan panas (KU1)
5. Mahasiswa mengkaji implikasi pengembangan atau implementasi konsep proses perpindahan massa dan panas berdasarkan kaidah, tata cara dan etika ilmiah untuk menghasilkan solusi, gagasan, desain, atau kritik serta menyusun deskripsi saintifik hasil kajiannya dalam bentuk skripsi atau laporan tugas akhir (KU2)
6. Mahasiswa mampu menerapkan konsep matematika, sains, dan prinsip rekayasa (*engineering principles*) untuk menyelesaikan masalah rekayasa kompleks pada proses, sistem proses, dan peralatan yang diperlukan untuk mengubah bahan baku menjadi produk yang mempunyai nilai tambah (melalui proses fisika, kimia dan/atau biologi) sesuai dengan tinjauan proses perpindahan massa dan panas (KK1)

### C. Deskripsi singkat mata kuliah

Mata Kuliah ini bertujuan untuk meningkatkan kemampuan mahasiswa dalam mengembangkan konsep/teori yang perancangan bidang keteknikkimiaan. Kajian utama meliputi: konsep dasar perpindahan massa difusional, difusi molekuler, difusi melalui *non stagnant film*, transfer massa antar fase, operasi humidifikasi, operasi pengeringan, evaporasi, dan kristalisasi. Perkuliahan dilaksanakan dengan pendekatan *student center learning*. Penilaian berbasis kompetensi mencakup: partisipasi aktif, portofolio tugas-tugas, ujian tengah semester dan ujian akhir semester.

D. Mata kuliah Prasyarat : -

### E. Team Teaching

1. Koordinator : Gita Indah Budiarti, S.T., M.T.
2. Anggota : Shinta Amelia, S.T., M.Eng.

### E. Matrik RPS

Minggu/ Pertemuan Ke	Capaian Pembelajaran Mingguan	Materi Pembelajaran	Metode/ Strategi Pembelajaran	Aktivitas Pembelajaran/ Pengalaman Mahasiswa	Sumber Belajar dan Bahan Ajar	PENILAIAN		
						Indikator Penilaian	Bentuk Penilaian	Bobot
1	Mahasiswa dapat menjelaskan dan menerapkan tentang: dasar-dasar transfer massa, konsentrasi, fluks dan Hukum Fick's.	Konsep dasar perpindahan massa difusional: 1. Dasar-dasar Transfer Massa 2. Konsentrasi 3. Fluks dan hukum Fick's	Interactive learning (ceramah, dialog, diskusi)	Mahasiswa mempersepsi bahan kajian Mahasiswa mengkaji silabus serta referensi yang diberikan	6	7	8	9
1				Mahasiswa mampu menjelaskan dasar-dasar transfer massa, konsentrasi, fluks, Hukum Fick's.	1,2,3,4,5,6,7,10		Keaktifan	
2	Mahasiswa mampu menjelaskan dan menerapkan tentang konsep perpindahan massa difusional (koefisien difusi	Konsep dasar perpindahan massa difusional: 1. Koefisien difusi 2. Koefisien difusi gas 3. Koefisien difusi cairan	Interactive learning (ceramah, dialog, diskusi), latihan soal	Mahasiswa mempersepsi materi ajar Kelompok mahasiswa mendiskusikan latihan soal	1,2,3,4,5,6,7	Mahasiswa mampu menghitung koefisien difusi gas dan koefisien difusi cairan	Penugasan 1	

Minggu/ Pertemuan Ke	Capaian Pembelajaran Mingguan	Materi Pembelajaran	Metode/ Strategi Pembelajaran	Aktivitas Pembelajaran/ Pengalaman Mahasiswa	Sumber Belajar dan Bahan Ajar	PENILAIAN		
						Indikator Penilaian	Bentuk Penilaian	Bobot
1	gas, cairan, dan persamaan transfer massa)	3 4. Persamaan transfer massa	4	5	6	7	8	9
3	Mahasiswa mampu menjelaskan dan menerapkan tentang difusi molekuler dalam keadaan tetap.	Difusi molekuler dalam keadaan tetap: 1. Difusi molekuler satu dimensi 2. Difusi molekuler fase gas 3. Difusi molekuler fase cair 4. Analogi proses transfer	Interactive learning (ceramah, dialog, diskusi)	Mahasiswa mempersepsi materi ajar Kelompok mahasiswa mendiskusikan latihan soal	1, 2, 3, 4, 5, 6	Mahasiswa mampu menghitung kecepatan difusi molekuler satu dimensi, fase gas.	Keaktifan	

Minggu/ Pertemuan Ke	Capaian Pembelajaran Mingguan	Materi Pembelajaran	Metode/ Strategi Pembelajaran	Aktivitas Pembelajaran/ Pengalaman Mahasiswa	Sumber Belajar dan Bahan Ajar	PENILAIAN		
						Indikator Penilaian	Bentuk Penilaian	Bobot
1	Mahasiswa mampu menjelaskan dan menerapkan tentang difusi melalui non stagnan film.	Difusi melalui non stagnan film: 1. Koefisien transfer massa 2. Satuan koefisien transfer massa 3. Difusi olakan 4. Analisis dimensional 5. Persamaan koefisien transfer massa	4	5	6	7	8	9
4			Interactive learning (ceramah, dialog, diskusi), Pemberian Home Work	Mahasiswa mempersepsi materi ajar Kelompok mahasiswa mendiskusikan latihan soal	1,2,3,4,5,6	Mahasiswa mampu menghitung koefisien transfer pada difusi melalui non stagnan film.	Penugasan 2	

Minggu/ Pertemuan Ke	Capaian Pembelajaran Mingguan	Materi Pembelajaran	Metode/ Strategi Pembelajaran	Aktivitas Pembelajaran/ Pengalaman Mahasiswa	Sumber Belajar dan Bahan Ajar	PENILAIAN		
						Indikator Penilaian	Bentuk Penilaian	Bobot
1	Mahasiswa dapat menjelaskan dan menerapkan transfer massa antar fase	Transfer massa antar fase: 1. Keseimbangan 2. Koefisien transfer massa lokal 3. Koefisien transfer massa keseluruhan	4	5	6	7	8	9
5	Mahasiswa dapat menjelaskan dan menerapkan transfer massa antar fase	Transfer massa antar fase: 1. Keseimbangan 2. Koefisien transfer massa lokal 3. Koefisien transfer massa keseluruhan	Interactive learning (ceramah, dialog, diskusi), latihan soal	Mahasiswa mempersepsi materi ajar Kelompok mahasiswa mendiskusikan latihan soal	1,2,3,4,5,6	Mahasiswa dapat menghitung koefisien transfer massa antar fase, lokal, dan keseluruhan.	Keaktifan	
6	Mahasiswa dapat menjelaskan transfer massa antar fase	Transfer massa antar fase: 1. Alat-alat transfer massa 2. Koefisien kapasitas transfer massa	Latihan soal, Interactive learning (ceramah, dialog, diskusi)	Mahasiswa mempersepsi materi ajar Kelompok mahasiswa mendiskusikan latihan soal	1,2,3,4,5,6,11	Mahasiswa mampu menjelaskan alat-alat transfer massa, dan analisis alat kontak kontinu.	Penugasan 3	

Minggu/ Pertemuan Ke	Capaian Pembelajaran Mingguan	Materi Pembelajaran	Metode/ Strategi Pembelajaran	Aktivitas Pembelajaran/ Pengalaman Mahasiswa	Sumber Belajar dan Bahan Ajar	PENILAIAN		
						Indikator Penilaian	Bentuk Penilaian	Bobot
1		3. Menjelaskan analisis alat kontak kontinu	4	5	6	7	8	9
7	Mahasiswa dapat menjelaskan operasi humidifikasi	Operasi humidifikasi: 1. Tekanan uap 2. Entalpi 3. Kelembapan adiabatik 4. Analisis alat kontak gas-cair 5. Menara pendingin	Interactive learning (ceramah, dialog, diskusi)	Mahasiswa mempersepsi materi ajar Kelompok mahasiswa mendiskusikan latihan soal	1,2,3,4,5,6	Mahasiswa mampu membaca diagram psikrometrik	Keaktifan	
UJIAN TENGAH SEMESTER								

Minggu/ Pertemuan Ke	Capaian Pembelajaran Mingguan	Materi Pembelajaran	Metode/ Strategi Pembelajaran	Aktivitas Pembelajaran/ Pengalaman Mahasiswa	Sumber Belajar dan Bahan Ajar	PENILAIAN		
						Indikator Penilaian	Bentuk Penilaian	Bobot
1		3	4	5	6	7	8	9
8	Mahasiswa dapat menjelaskan operasi Dehumidifikasi	Operasi Dehumidifikasi: 1. Dehumidifikasi 2. Pendinginan pelebmbapan adiabatiss	Interactive learning (ceramah, dialog, diskusi)	Mahasiswa mempersepsi bahan kajian Mahasiswa mengkaji silabus serta referensi yang diberikan	1,2,3,4,5,6	Mahasiswa mampu menjelaskan dehumidifikasi, pendinginan pelebmbapan adiabatiss.	Keaktifan	
9	Mahasiswa dapat menjelaskan operasi pengeringan	Operasi pengeringan: 1. Keseimbangan 2. Zat padat dapat larut dan tak dapat larut 3. Mekanisme pengeringan 4. Gerakan cairan dalam padatan	Interactive learning (ceramah, dialog, diskusi), latihan soal	Mahasiswa mempersepsi materi ajar Kelompok mahasiswa mendiskusikan latihan soal	1,2,3,4,5,6	Mahasiswa mampu menjelaskan tentang mekanisme pengeringan. Mahasiswa dapat membuat kurva pengeringan	Penugasan 4	

Minggu/ Pertemuan Ke	Capaian Pembelajaran Mingguan	Materi Pembelajaran	Metode/ Strategi Pembelajaran	Aktivitas Pembelajaran/ Pengalaman Mahasiswa	Sumber Belajar dan Bahan Ajar	PENILAIAN		
						Indikator Penilaian	Bentuk Penilaian	Bobot
1		3	4	5	6	7	8	9
		5. Pengaruh perubahan kondisi penguapan						
10	Mahasiswa dapat menjelaskan operasi penguapan	Operasi penguapan: 1. Penguapan secara kontinu 2. Penguapan pada suhu tinggi 3. Penguapan pada suhu rendah	Interactive learning (ceramah, dialog, diskusi)	Mahasiswa mempersepsi materi ajar Kelompok mahasiswa mendiskusikan latihan soal	1,2,3,4,5,6,8	Mahasiswa mampu menjelaskan operasi penguapan secara kontinu, dan suhu tinggi, dan suhu rendah.	Keaktifan	

Minggu/ Pertemuan Ke	Capaian Pembelajaran Mingguan	Materi Pembelajaran	Metode/ Strategi Pembelajaran	Aktivitas Pembelajaran/ Pengalaman Mahasiswa	Sumber Belajar dan Bahan Ajar	PENILAIAN		
						Indikator Penilaian	Bentuk Penilaian	Bobot
1					6	7	8	9
11	Mahasiswa dapat menjelaskan operasi evaporasi	Operasi evaporasi: 1. Keseimbangan uap-cair 2. Perpindahan panas dan pemisahan uap 3. Jenis-jenis evaporator 4. Pengaturan evaporator	Interactive learning (ceramah, dialog, diskusi), Pemberian Home Work	Mahasiswa mempersepsi materi ajar Kelompok mahasiswa mendiskusikan latihan soal	1,2,3,4,5,6,8	Mahasiswa mampu menjelaskan keseimbangan uap-cair, perpindahan massa dan pemisahan uap.	Penugasan 5	
12	Mahasiswa dapat menjelaskan operasi evaporasi	Operasi evaporasi: 1. Jenis-jenis evaporator 2. Pengaturan evaporator 3. Perhitungan	Interactive learning (ceramah, dialog, diskusi), latihan soal	Mahasiswa mempersepsi materi ajar Kelompok mahasiswa mendiskusikan latihan soal	1,2,3,4,5,6,9	Mahasiswa mampu menjelaskan jenis-jenis evaporator dan pengaturannya.	Keaktifan	

Minggu/ Pertemuan Ke	Capaian Pembelajaran Mingguan	Materi Pembelajaran	Metode/ Strategi Pembelajaran	Aktivitas Pembelajaran/ Pengalaman Mahasiswa	Sumber Belajar dan Bahan Ajar	PENILAIAN		
						Indikator Penilaian	Bentuk Penilaian	Bobot
1	Mahasiswa dapat menjelaskan operasi kristalisasi	Operasi kristalisasi: 1. Prinsip-prinsip kristalisasi 2. Efek panas pada kristalisasi 3. Kristalisasi multikomponen	4	5	6	7	8	9
13	Mahasiswa dapat menjelaskan operasi kristalisasi	Operasi kristalisasi: 1. Prinsip-prinsip kristalisasi 2. Efek panas pada kristalisasi 3. Kristalisasi multikomponen	Interactive learning (ceramah, dialog, diskusi)	Mahasiswa mempersepsi materi ajar Diskusi	1,2,3,4,5,6	Mahasiswa mampu menjelaskan tentang prinsip kristalisasi, efek panas pada kristalisasi, serta kristalisasi multikomponen.	Penugasan 6	
14	Mahasiswa dapat menjelaskan operasi kristalisasi	Operasi kristalisasi: 1. Pertumbuhan kristal 2. Jenis alat-alat kristalisasi 3. Perhitungan	Interactive learning (ceramah, dialog, diskusi)	Mahasiswa mempersepsi materi ajar Diskusi	1,2,3,4,5,6	Mahasiswa mampu menjelaskan tentang pertumbuhan kristal, jenis alat kristalisasi, dan perhitungannya.	Keaktifan	

## G. Referensi

1. Brown, G.G., Katz, D., Foust, A.S., and Scheneidewind, R., 1973, Unit Operations, John Wiley and Sons, Inc., New York.
2. Foust, A.S., 2008, Principles of Unit Operations 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
3. McCabe, W.L. *et al.*, 2005, Unit Operations of Chemical Engineering 7<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill Higher Education, New York.
4. Perry, R.H., Green, D.W., and Maloney, J.O., 2018, Perry's Chemical Engineering's Handbook 9<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill Book Co, New York.
5. Schweitzer, P.A., 1997, Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineering, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill Book Co, New York.
6. Treyball, R.E., 2012, Mass Transfer Operation 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill Book Co, New York.
7. Welty, J.R., Wicks, C.E., and Wilson, R.E., 2014, Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer 6<sup>th</sup> edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
8. Setyawan, M., Maryudi, 2015, Analisa Perpindahan Panas dan Pengembangan pada Pengembangan Uap Cair dengan Pengembangan Parsial Bertingkat, *Chemica*, Vol. 2 No. 2: pp. 53-56.
9. Nurkholis, Jamilatun, S., 2016, Pengaruh Luas Perpindahan Panas Kondensor terhadap Volume Asap Cair Terkondensasi Hasil Pirolysis Tempurung Kelapa, *Chemica*, Vol. 3 No. 2; pp. 61-65.
10. Sulistiawati, E., Sari, A., Hidayati, R., 2012, Dekolorisasi crude rice bran oil menggunakan bentonit, *Spektrum Industri*, Vol. 10 No. 1: pp. 11-18.

11. Amelia, S., Sediawan, W.B., Prasetyo, I., Ariyanto, T., 2017, Degradasi Limbah Zat Warna dengan Katalis Karbon Aktif Teremban Oksida Besi, Prosiding SNST ke-8: pp. 24-29.

#### H. Komponen Evaluasi (CP)

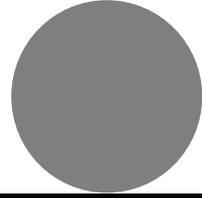
Aspek Penilaian	Persentase
Ujian Akhir Semester	30 %
Ujian Tengah Semester	30 %
Tugas/Kuis	25 %
Keaktifan Mahasiswa	5 %
Sikap	5 %
Kehadiran	5 %
<b>Total</b>	<b>100 %</b>

#### I. Kriteria Evaluasi

(menyesuaikan ketentuan Universitas)

Diverifikasi oleh:	Diperiksa Oleh:		Disiapkan oleh:
Dekan Fakultas Teknologi Industri  Sunardi, S.T., M.T., Ph.D	Kaprodi Teknik Kimia  Dr. Erna Astuti, S.T., M.T.	Koordinator Bid. Ilmu  Maryudi, S.T., M.T., Ph.D.	Dosen Pengampu  Gita Indah Budiarti, S.T., M.T. Shinta Amelia, S.T., M.Eng.





## Tentang Penulis

**Gita Indah Budiarti, S.T., M.T.**

NIY : 60160953

NIDN : 0530129201

TTL : Surakarta, 30 Desember 1992

E-mail : gita.indah@che.uad.ac.id

Telepon/HP : 082314285446

Kantor : Jl. Prof. Dr. Soepomo, SH,  
Warungboto, Yogyakarta 55164

Telepon/Faks: (0274)563515, 511830. Fax (0274)564604

Lulusan yang Telah Dihasilkan : 6 orang

Mata Kuliah yang Diampu : Teknik Reaksi Kimia 2

Proses Industri Kimia 2

Teknik Reaksi Kimia 1



### Riwayat Pendidikan

S-1 Teknik Kimia Universitas Muhammadiyah Surakarta (2010-2014)

Skripsi : Prarancangan Pabrik Disodium Phosphate Heptahydrate dari Sodium Carbonate dan Phosphoric Acid Kapasitas 70.000 Ton/Tahun

S-2 Magister Teknik Kimia Universitas Diponegoro (2014-2015)

Tesis : Konversi Pati Ubi Kayu (Cassava Starch) menjadi Glukosa dan Fruktosa dengan Bantuan Gelombang Mikro

### **Pengalaman Penelitian dalam 5 Tahun Terakhir**

1. Modifikasi Tepung Labu Kuning sebagai Pengganti Gandum tahun 2017
2. Aplikasi *Hydrogen Rich Water* pada Tepung Kentang Modifikasi sebagai Pengganti Gandum tahun 2017
3. Pemanfaatan limbah makanan sebagai *co-digestion* pada produksi biogas dari jerami jagung dengan metode *solid-state anaerobic digestion* (ss-ad) tahun 2018
4. Aplikasi Microwave pada Tepung Kentang Termodifikasi *Hydrogen Rich Water* tahun 2018
5. Produksi Tepung Kentang Modifikasi Hydrogen Rich Water Sebagai Pengganti Terigu tahun 2019

### **Pengabdian Kepada Masyarakat dalam 5 Tahun Terakhir**

1. Pelatihan pembuatan sabun bagi warga kelompok tani Desa Gulon, Srihardono, Pundong, Bantul, Yogyakarta, tahun 2017
2. Pembimbingan Olimpiade Sains Nasional tingkat SMA kota Yogyakarta di SMA Muhammadiyah 2 Yogyakarta, tahun 2017
3. Pelatihan Pembuatan Sabun Cair, Teh Herbal dan Tepung Kentang di SMA Muhammadiyah 2 Yogyakarta, tahun 2018
4. Pelatihan Teknologi Tepat Guna Pembuatan Sabun Cuci Piring Cair di lokasi KKN Alternatif Gedongtengen tahun 2018
5. Pemberdayaan Kelompok Ibu-Ibu Aisyiyah dalam Produksi dan Pemasaran Makanan Kecil Sehat di Karangduwet, Paliyan, Gunung Kidul, tahun 2019

### **Publikasi Artikel Ilmiah dalam 5 Tahun Terakhir**

1. “Studi Konversi Pati Ubi Kayu (Cassava Starch) menjadi Glukosa secara Enzimatik” dalam *Chemica* Vol. 3 No. 1 (2016).
2. “Pengaruh Total Solid dan Perbandingan Bahan Baku dengan Inokulum terhadap Produksi Biogas dari Jerami Jagung” dalam *Chemica* Vol. 5 No. 1 (Juni 2018).
3. “Aplikasi Hydrogen Rich Water Pada Modifikasi Tepung Kentang dengan Pengering Gelombang Mikro sebagai Alternatif Substitusi Gandum” dalam *ELKAWNIE* Vol.5 No.2 (Desember 2019).
4. “Penerapan Teknologi Toko Online untuk Pemasaran Produk Bagi Ibu-Ibu Aisyiyah Gunung Kidul” dalam *Journal of Character Education Society* Vol. 3 No. 1 (Januari 2020).

### **Pemakalah Seminar Ilmiah (*Oral Presentation*) dalam 5 Tahun Terakhir**

1. “Modifikasi Tepung Labu Kuning Menggunakan Hydrogen Rich Water Sebagai Pengganti Gandum” dalam Seminar Nasional Teknologi Universitas Muhammadiyah Purwokerto di Hotel Java Heritage Purwokerto, 7 Oktober 2017.
2. “Perbandingan Model Kinetika Pembuatan Biogas dari Jerami Jagung dengan Co-Digestion Limbah Makanan dalam Seminar Nasional CIASTECH di Universitas Widyagama Malang, 12 September 2018.
3. “Quality improvement of recycled paper with extracted xylan from corncobs” dalam 2nd ANSWER 2019 *Annual Symposium on Solid Waste Refinery* di Eastparc Hotel Yogyakarta, 13-14 November 2019.
4. “Physicochemical characteristic of hydrogen rich water potato flour” dalam *The 3rd International Conference on Innovation in Engineering and Vocational Educational (ICIEVE 2019)* di Mason Pine Hotel Bandung, 26 November 2019.
5. “Modifikasi Proses Bleaching Tepung Kentang Sebagai Pengganti Terigu” dalam Seminar Nasional dan *Call for Papers "Safety dan Halal 2019"* di Universitas Muhammadiyah Surakarta, 30 Oktober 2019.

**Shinta Amelia, S.T., M.Eng**

NIY : 60181174

NIDN : 0526068902

TTL : Tangerang, 26 Juni 1989

E-mail : shinta.amelia@che.uad.ac.id

Telepon/HP : 085869843762

Kantor : Kampus 4 Universitas Ahmad

Dahlan, Jl. Ringroad Selatan, Tamanan, Banguntapan,  
Bantul, 55191

Telepon/Faks: (0274)563515, 511830. Fax (0274)564604

Lulusan yang Telah Dhasilkan : -

Mata Kuliah yang Diampu : Penyimpanan dan Transportasi Fluida  
Proses Industri Kimia 1  
Optimasi Teknik Kimia  
Operasi Pemisahan Bertingkat  
Operasi Perpindahan Massa dan Panas  
Proses Industri Kimia II



**Riwayat Pendidikan**

S-1 Teknik Kimia Universitas Diponegoro (2007-2011)

Skripsi : Prarancangan Pabrik Bioethanol dari Tepung Tapioka Kapasitas  
150.000 kL/Tahun

S-2 Magister Teknik Kimia Universitas Gadjah Mada (2015-2017)

Tesis : Pembuatan Katalis Oksida Besi dengan Pengembangan Karbon  
Aktif dan Uji Aktivitas Katalitiknya untuk Reaksi Dekolorisasi  
Methylene Blue

**Pengabdian Kepada Masyarakat dalam 3 Tahun Terakhir**

1. Juri OPSI (Olimpiade Penelitian Siswa Indonesia) di “Lomba Karya Tulis Ilmiah SMP/MTS Sekolah Rujukan se-DIY” SMP 5 Yogyakarta, tahun 2018.

2. Pelatihan Teknologi Tepat Guna: Pembuatan Sabun Cair Cuci Piring, tahun 2018
3. Pelatihan Teknologi Ramah Lingkungan di Desa Mulyodadi, Bambanglipuro, Bantul, tahun 2019
4. Pelatihan Pengelolaan dan Pengolahan Sampah Organik dan Anorganik di Tirtonirmolo, Bantul, tahun 2020

### **Publikasi Artikel Ilmiah dalam Jurnal dalam 3 Tahun Terakhir**

1. "Modification of Iron Oxide Catalysts Supported on The Biomass Based Activated Carbon for Degradation of Dye Wastewater" dalam *Jurnal Bahan Alam Terbarukan* (Nasional Terakreditasi SINTA 2) Vol. 7, No. 2 (Desember 2018), pp. 164-168.
2. "Uji Aktivitas Adsorben Karbon Aktif Tempurung Kelapa Termodifikasi dengan Active Site Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>" dalam *Chemica* (Nasional Terakreditasi SINTA 4) Vol. 5, No. 2 (Desember 2018), pp. 51-55.
3. "Degradation of surfactant waste of leather tanning using Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/activated carbon catalyst" dalam *Jurnal Majalah Karet, Kulit, dan Plastik* (Nasional Terakreditasi SINTA 2) Vol. 35(2) (Desember 2019), pp. 49-54.
4. "Removal of Methylene Blue of Textile Industry Waste with Activated Carbon Using Adsorption Method" dalam *Jurnal Reaktor* (Nasional Terakreditasi SINTA 2) Vol. 19, no. 4 (Desember 2019), pp. 168-171.
5. "Application of Natural Zeolite in Methylene Blue Wastewater Treatment Process by Adsorption Method" dalam *Jurnal Bahan Alam Terbarukan* (Nasional Terakreditasi SINTA 2) Vol. 8, No. 2 (Desember 2019), pp. 144-147.
6. "Role of the pore structure of Fe/C catalysts on heterogeneous Fenton oxidation" dalam *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Internasional terindeks Q1) Vol. 8, 102921 (Februari 2020).

### **Pemakalah Seminar Ilmiah (*Oral Presentation*) dalam 3 Tahun Terakhir**

1. “Degradasi Limbah Zat Warna dengan Katalis Karbon Aktif Teremban Oksida Besi” dalam Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2017 di Semarang, 23 Agustus 2017.
2. “Esterification of Glycerol with Acetic Acid in Bioadditive Triacetin with  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ /Activated Carbon Catalyst” dalam Seminar Internasional “*2nd Annual Symposium on Solid Waste Refinery (ANSWER 2019)*” di Yogyakarta, 12 November 2019.
3. “Effect of Absorbent for Gas Purification Unit in Biomass Gasification Process with Downdraft Method” dalam Seminar Internasional “*The Third International Conference on Innovation in Engineering and Vocational Education (ICIEVE 2019)*” di Bandung, 26 November 2019.