

OPERASI PERPINDAHAN

MASSA DAN PANAS

**ASWATI MINDARYANI
HANIFRAHMAWAN SUDIBYO**



GADJAH MADA UNIVERSITY PRESS

PENGANTAR EDITOR

Transfer massa merupakan salah satu fenomena yang harus dipelajari oleh mahasiswa Teknik Kimia. Kecepatan Transfer massa perlu diketahui untuk menghitung ukuran alat proses pemisahan yang akan beroperasi di Industri Kimia.

Dalam buku ini akan dibahas secara tuntas mengenai cara menghitung serta mengestimasi kecepatan transfer massa tersebut. Ada beberapa faktor yang harus diperhitungkan dalam hal ini, seperti nilai konsentrasi, koefisien transfer massa, dan masih banyak lagi. Beberapa persamaan empiris disajikan untuk mempermudah perhitungan. Tidak hanya itu, penulis juga menyertakan beberapa contoh penerapan persamaan tersebut. Saat kecepatan transfer massa sudah dapat diestimasi, maka penulis berharap pembaca mampu menentukan dimensi dari alat yang digunakan untuk menjalankan transfer massa tersebut, seperti menara absorber, menara stripper, kolom adsorpsi, dan kolom untuk proses ekstraksi. Sedangkan pada proses yang simultan perpindahan massa dan perpindahan panas juga berlangsung, maka pembaca juga diharapkan pada akhirnya dapat mendesain sebuah menara pendingin dan rotary dryer.

PENGANTAR PENULIS

Dalam penerapan ilmu teknik kimia yang nyata, kasus perpindahan massa dan panas merupakan kasus yang paling sering ditemui. Didukung dengan konsep dasar persamaan kecepatan proses (*rate processes*), pemahaman konsep perpindahan massa dan perpindahan panas menjadi sangat penting dalam memahami berbagai cara kerja peralatan dalam proses yang ada di industri dan melakukan penyelesaian permasalahan yang ditemui selama operasi.

Buku Operasi Perpindahan Massa dan Panas ini ditulis dengan harapan, pembaca mampu memahami konsep-konsep dasar tentang perpindahan massa, dan proses perpindahan massa dan perpindahan panas simultan. Sasaran pembacanya tentu saja mahasiswa, akademisi, dan juga pemula di dunia profesional yang terjun ke dalam industri proses.

Pada bagian awal dari buku ini, akan dijelaskan tentang konsep dasar mengenai transfer massa secara difusi dan konveksi, serta bagaimana mengestimasi konstanta perpindahan massa seperti difusivitas, koefisien transfer massa dan lain-lain. Perhitungan ukuran alat yang beroperasi isothermal, yang didasarkan pada proses perpindahan massa saja, dijelaskan dan dipraktekkan untuk menghitung tinggi kolom absorpsi, adsorpsi, ekstraksi maupun stripper. Selanjutnya, akan dijelaskan lebih dalam mengenai konsep perpindahan massa dan panas secara simultan yang terjadi pada proses humidifikasi dan pengeringan, sekaligus menghitung tinggi kolom menara pendingin dan panjang pengering.

Jika dalam penyusunan buku Operasi Perpindahan Massa dan Panas ini masih banyak kelemahan, maka penulis memohon masukan dan saran agar edisi selanjutnya bisa lebih sempurna.

Yogyakarta, 1 Juli 2017
Aswati Mindaryani
Hanifrahmawan Sudibyo

DAFTAR ISI

PENGANTAR EDITOR	v
PENGANTAR PENULIS	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
BAB 2 DASAR-DASAR TRANSFER MASSA	
2.1. Definisi	5
2.2. Fluks dan Hukum Fick.....	7
2.3. Koefisien Difusi (Difusivitas)	9
2.4. Difusi Olakan	21
2.5. Kestimbangan.....	22
2.6. Perpindahan Massa Konveksi	31
2.7. Pengenalan Alat Transfer Massa	39
<i>Latihan Soal</i>	41
BAB 3 ABSORPSI	
3.1. Perancangan Menara Absorber (Isotermal dan Konsentrasi Solut di Gas Rendah)	44
3.2. Perancangan Menara Absorber (Isotermal dan Konsentrasi Solut di Gas Tinggi)	55
3.3. Absorpsi Arus Searah.....	59
3.4. Transfer Massa pada Packed Tower Absorber	60
3.5. Absorpsi Non-Isotermal	69
<i>Latihan Soal</i>	78

BAB 4	ESTIMASI PARAMETER PERPINDAHAN MASSA	
	4.1. Film Theory.....	81
	4.3. Perpindahan Massa pada <i>Flat Plat</i>	96
BAB 5	CARA ANALOGI	
	5.1. Analogi Reynold	101
	5.2. Analogi Colburn.....	103
	5.3. Analogi Chilton Colburn.....	104
BAB 6	BOUNDARY LAYER THEORY	
	6.1. <i>Boundary Layer</i> untuk Momentum.....	110
	6.2. <i>Boundary Layer</i> untuk Konsentrasi.....	113
	6.3. <i>Boundary Layer</i> untuk Suhu	119
BAB 7	HUMIDIFIKASI	
	7.1. Kelembaban dan Kejenuhan (<i>Humidity</i> dan <i>Saturation</i>).....	123
	7.2. Pendinginan Adiabatik	127
	7.3. Humidifikasi Kontinu (<i>Cooling Tower Design</i>).....	130
BAB 8	PENGERINGAN (<i>DRYING</i>)	
	8.1. Jenis Air dalam Proses <i>Drying</i>	141
	8.2. Kurva Kecepatan Pengeringan.....	143
	8.3. Klasifikasi <i>Dryers</i> Berdasarkan Bahan yang Dikeringkan.....	148
	8.4. Mekanisme <i>Drying Batch</i>	149
	8.5. Perancangan <i>Rotary Dryer</i>	152
	DAFTAR PUSTAKA.....	163
	INDEKS.....	165
	TENTANG PENULIS.....	169

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Konstanta Henry Berbagai Gas dalam Air pada Suhu 25° C.....	25
Tabel 2.2.	Konstanta Henry Berbagai Gas dalam Air pada Suhu 30° C.....	26
Tabel 2.3.	Data kelarutan SO ₂ dalam Air pada Suhu 30° C dan 1 atm.....	28
Tabel 2.4.	Data kesetimbangan SO ₂ dalam Air pada Suhu 30° C..	29
Tabel 3.1.	<i>Packing Factor</i> (F) pada Menara <i>Absorber</i>	49
Tabel 3.2.	Nilai K _G a untuk berbagai macam sistem.....	62
Tabel 3.3.	Nilai K _G a relatif untuk berbagai macam packing.....	62
Tabel 3.4.	Nilai K _G a untuk sistem CO ₂ /NaOH dengan packing logam.....	63
Tabel 3.5.	Nilai K _G a untuk sistem CO ₂ /NaOH dengan packing plastik.....	63
Tabel 3.6.	Nilai K _G a untuk sistem CO ₂ /NaOH dengan packing keramik.....	63
Tabel 3.7.	Nilai K _G a untuk sistem CO ₂ /NaOH dengan packing terstruktur	64
Tabel 3.8.	Nilai konstanta pada berbagai jenis dan ukuran packing untuk menentukan nilai k _L a.....	65
Tabel 3.9.	Hasil perhitungan Y* dari persamaan	68
Tabel 6.1.	Persamaan umum transfer momentum, transfer massa, dan transfer panas.....	109
Tabel 7.1.	Perbandingan nilai $\frac{h_G}{k_Y}$ eksperimen dengan hasil perhitungan.....	128

Tabel 7.2.	Tahap perhitungan T_s dengan <i>trial and error</i> pada contoh 7.1.	129
Tabel 7.3.	Tahap perhitungan <i>wet bulb temperature</i> (T_w) dengan <i>trial and error</i> pada Contoh 7.1.	130
Tabel 7.4.	Hubungan T_i terhadap H_i	135
Tabel 7.5.	Perhitungan untuk menentukan garis kesetimbangan pada Contoh 7.2.	137
Tabel 7.6.	Data untuk perhitungan menggunakan metode Trapezoidal pada soal poin a di Contoh 7.2.	137
Tabel 7.7.	Data untuk perhitungan menggunakan metode Trapezoidal pada soal poin a di Contoh 7.2.	139

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Skema Pengolahan Bahan Baku Menjadi Produk.....	2
Gambar 2.1.	Difusivitas cairan A dalam udara di tabung	12
Gambar 2.2.	Difusi cairan dalam gelas berpori.....	18
Gambar 2.3.	Difusi cairan di pipa kapiler	19
Gambar 2.4.	Kurva kesetimbangan P dan C	23
Gambar 2.5.	Fenomena proses menuju <i>kesetimbangan</i>	24
Gambar 2.6.	Perubahan <i>kesetimbangan</i> seiring perubahan tekanan.	25
Gambar 2.7.	Hubungan x dan y dari senyawa SO ₂	30
Gambar 2.8.	Ilustrasi daerah laminar, transisi, dan turbulen.....	32
Gambar 2.9.	Ilustrasi teori dua lapisan film	34
Gambar 2.10.	Ilustrasi lapisan film gabungan di (a) fase gas dan (b) fase cair	36
Gambar 2.11.	Sistem kontak gas-cair dalam (a) spray column dan (b) bubble column.....	39
Gambar 2.12.	Sistem kontak gas-cair dalam (a) <i>tray column</i> dan (b) <i>packed column</i>	40
Gambar 3.1.	Skema kombinasi sistem absorpsi dan <i>stripping</i> dalam industri.....	44
Gambar 3.2.	Ilustrasi perancangan menara absorber	45
Gambar 3.3.	Garis operasi absorpsi pada kurva kesetimbangan.....	45
Gambar 3.4.	Garis operasi absorpsi dengan L/G min	46
Gambar 3.5.	Grafik <i>pressure drop</i> untuk (a) <i>random packing</i> dan (b) <i>structured packing</i>	47
Gambar 3.6.	Grafik <i>flooding line</i>	47
Gambar 3.7.	Ilustrasi menara <i>absorber</i>	50
Gambar 3.8.	Ilustrasi <i>loop</i> bawah menara <i>absorber</i>	51

Gambar 3.9.	Ilustrasi elemen volume pada menara absorber	52
Gambar 3.10.	Contoh urutan perhitungan tinggi menara absorber	57
Gambar 3.11.	Skema absorpsi arus searah.....	60
Gambar 3.12.	Ilustrasi hubungan garis kesetimbangan garis operasi pada kurva hubungan fraksi mol A di fase gas dan fase cairan	61
Gambar 3.13.	Skema transfer massa dan panas pada elemen volum di sistem <i>absorber</i> non-isothermal	75
Gambar 4.1.	Aliran massa komponen A dalam elemen volum lapisan film pada fase cair	81
Gambar 4.2.	Ilustrasi <i>Penetrasi Theory</i> pada transfer massa komponen A dari fase gas menuju fase cair dan terakumulasi pada fase cair	83
Gambar 4.3.	Ilustrasi <i>penetration theory</i> pada <i>Wetted Wall Column</i> : Transfer Massa Komponen A dari Fase Gas Menuju Fase Cair.....	86
Gambar 4.4.	Ilustrasi <i>Surface Renewal Model</i> : Transfer Massa Komponen A dari Fase Gas Menuju Fase Cair	88
Gambar 4.5.	(a) Ilustrasi proses operasi transfer absorpsi CO ₂ dengan menggunakan air (b) Ilustrasi transfer massa CO ₂ dari fase gas menuju fase cair (<i>film theory</i>).....	90
Gambar 5.1.	Ilustrasi tentang <i>Fully Developed Flow</i>	104
Gambar 6.1.	Teori <i>boundary layer</i> pada sebuah plat datar	110
Gambar 6.2.	115
Gambar 7.1.	Contoh <i>psychrometric chart</i>	126
Gambar 7.2.	<i>Closed loop cooling tower system</i>	131
Gambar 7.3.	<i>Mechanical draft counter-flow tower</i> dan <i>mechanical draft cross-flow tower</i>	132
Gambar 8.1.	Kurva jenis air di <i>drying</i>	142
Gambar 8.2.	Kurva X versus t pada kondisi pengeringan tetap untuk proses <i>batch</i>	144
Gambar 8.3.	Kurva kecepatan pengeringan (N_A) versus X pada kondisi pengeringan tetap untuk proses <i>batch</i>	145
Gambar 8.4.	Pengeringan melintang (<i>cross circulation drying</i>)	149

Gambar 8.5.	Pengeringan sirkulasi menerus (<i>through circulation drying</i>).....	151
Gambar 8.6.	Pembagian daerah/zona pada <i>counter-current rotary dryer</i>	153
Gambar 8.7.	Ilustrasi untuk Contoh 8.2.	159
Gambar 8.8.	Ilustrasi untuk Contoh 8.3.	161