



UNIVERSITAS INDONESIA

**ABSORPSI GAS CO₂ MELALUI KONTAKTOR MEMBRAN
SERAT BERONGGA MENGGUNAKAN LARUTAN
PENYERAP CAMPURAN SENYAWA AMINA (MEA/DEA) :
VARIASI LAJU ALIR PELARUT**

SKRIPSI

JULIAN CHRISTOFER

0806333215

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ABSORPSI GAS CO₂ MELALUI KONTAKTOR MEMBRAN
SERAT BERONGGA MENGGUNAKAN LARUTAN
PENYERAP CAMPURAN SENYAWA AMINA (MEA/DEA) :
VARIASI LAJU ALIR PELARUT**

SKRIPSI

JULIAN CHRISTOFER

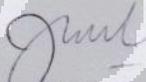
0806333215

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Julian Christofer
NPM : 0806333215
Tanda Tangan : 
Tanggal : 28 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Julian Christofer
NPM : 0806333215
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Absorpsi Gas CO₂ Melalui Kontakor Membran Serat Berongga Menggunakan Larutan Penyerap Campuran Senyawa Amina (MEA/DEA) : Variasi Laju Alir Pelarut

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Prof. Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc, Ph.D (.....)
Penguji : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT
Penguji : Eva Fathul Karamah, ST, MT.
Penguji : Prof. Dr. Ir. M. Nasikin, M.Eng.

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmatNya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penyusunan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, baik dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
2. Prof. Ir. Sutrasno Kartohardjono M.Sc., Ph.D. selaku pembimbing skripsi yang selalu sabar dalam membimbing penyusunan skripsi ini.
3. Dr.Ir.Nelson Saksono MT selaku pembimbing akademis selama menjalani masa kuliah di Teknik Kimia.
4. Orangtua tercinta yang selalu memberikan dukungan dan kasih dari kecil sampai jenjang pendidikan saat ini.
5. Teman-teman *research group* : Antonius Eriek dan Servatius S.T, teman-
6. Teman-teman Teknik Kimia 2008.

Terima kasih atas dukungan dan bantuan dari semua pihak yang telah diberikan. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan memberikan manfaat bagi dunia pendidikan dan ilmu pengetahuan.

Depok, Juni 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Julian Christofer
NPM : 0806333215
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

“Absorpsi Gas CO₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Larutan Penyerap Campuran Senyawa Amina (MEA/DEA) : Variasi Laju Alir Pelarut”

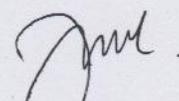
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 28 Juni 2012

Yang menyatakan


(.....Julian Christofer.....)

ABSTRAK

Nama : Julian Christofer

Program Studi : Teknik Kimia

Judul : Absorpsi Gas CO₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Larutan Penyerap Campuran Senyawa Amina (MEA/DEA) : Variasi Laju Alir Pelarut

Kontaktor membran serat berongga digunakan untuk mengabsorpsi gas CO₂ murni. Bahan membran yang digunakan adalah polipropilen dan pelarut yang digunakan merupakan pelarut campuran senyawa amina (MEA/DEA) dan dibandingkan pelarut tunggal DEA. Penelitian ini menganalisis efektivitas perpindahan massa dengan menghitung nilai koefisien perpindahan massa (k_L), fluks, dan korelasi perpindahan massa pada variasi laju alir pelarut 200,250,300,350,400 ml/menit dan jumlah serat 20,30,40. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pelarut campuran MEA/DEA lebih efektif menyerap gas CO₂ dibandingkan pelarut tunggal DEA pada laju alir 400 ml/menit dan jumlah serat 40 dengan nilai k_L , fluks dan sebesar 0.00244 cm/s dengan persentasi CO₂ yang terabsorpsi sebesar 93%.

Kata kunci : karbondioksida, kontaktor membran serat berongga, laju alir pelarut, jumlah serat, MEA, DEA.

ABSTRACT

Name : Julian Christofer

Major : Chemical Engineering

Title : CO₂ Absorption Through Hollow Fiber Membrane Contactor Using Mixed Amine as Solvent (MEA/DEA) : The Effect of Solvent Flow Rate.

Hollow fiber membrane contactor was used for the absorption of pure carbon dioxide. The membranes applied were made of PVC and the absorbents included aqueous solution of mixed amine (MEA/DEA) that would be compared with single amine absorbent. This research determined the mass transfer efficiency with determining mass transfer coefficient, flux and mass transfer correlation under different absorbent flow rate 200,250,300,350,400 cc/minutes and number of fiber 20,30,40. The results showed that the mixed amine absorbent was more effective in doing absorption than the single amine under the flow rate absorbent 400 cc/minutes and number of fiber 40 with the value k_L 0.00244 cm/s with percentage of CO₂ absorbed 93%.

Keywords : carbon dioxide, hollow fiber membrane contactor, solvent flow rate, number of fiber, MEA, DEA.

DAFTAR ISI

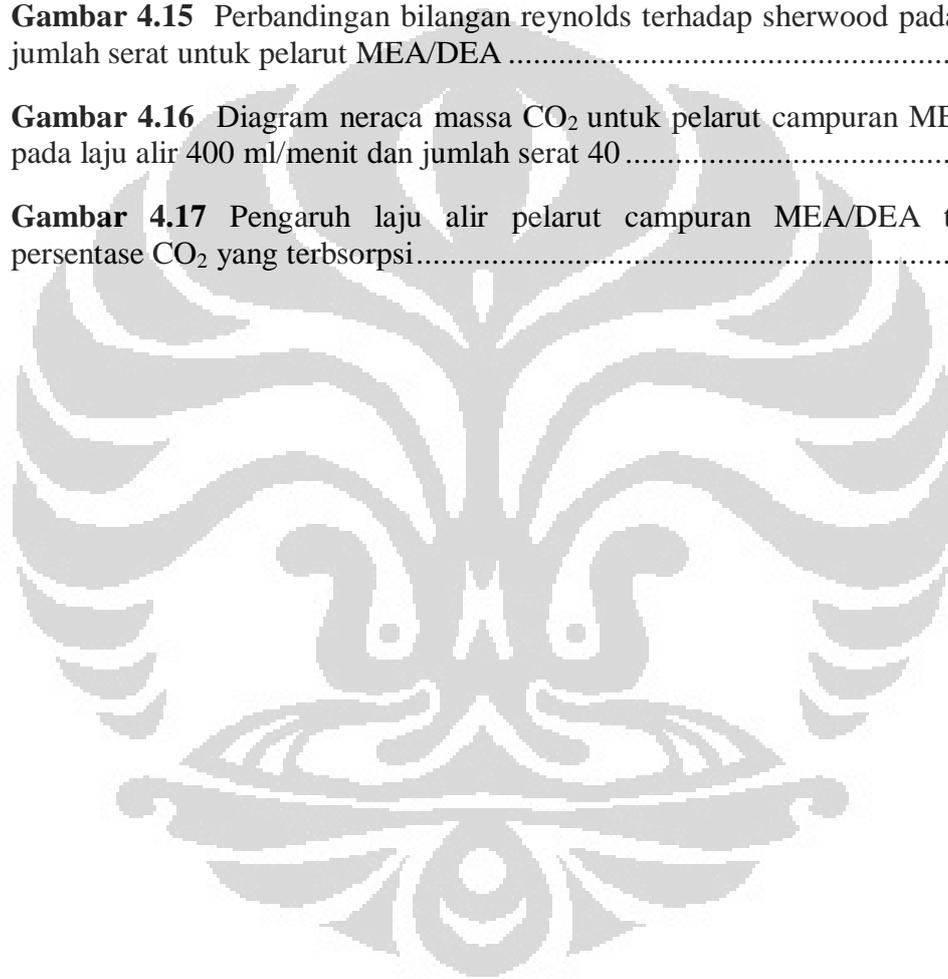
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR SIMBOL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Gas CO ₂ dalam Gas Alam.....	6
2.1.1 Sifat Gas CO ₂	6
2.1.2 Pengaruh CO ₂ dalam Gas Alam	6
2.2 Absorpsi CO ₂	7
2.2.1 Proses Absorpsi CO ₂	7
2.2.2 Pelarut dalam Absorpsi CO ₂	8
2.3 Teknologi Membran	11
2.3.1 Proses pemisahan dengan Teknologi Membran.....	12
2.3.2 Membran Berstruktur PVC	13
2.3.3 Kontaktor Membran.....	14
2.3.4 Absorpsi CO ₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga	15

2.3.5	Studi Perpindahan Massa	19
2.4	State of The Art	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		25
3.1	Pendahuluan.....	25
3.2	Rancangan Penelitian.....	25
3.2.1	Studi Literatur.....	25
3.2.2	Experimental Set-Up.....	26
3.2.3	Uji Perpindahan Massa	28
3.2.4	Pengolahan Data dan Analisis	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		32
4.1	Pendahuluan.....	32
4.2	Koefisien Perpindahan Massa dan Fluks Perpindahan Massa	33
4.2.1	Pengaruh Laju Alir Pelarut	34
4.2.2	Pengaruh Jumlah serat	37
4.2.3	Pengaruh jenis pelarut	40
4.3	Acid Loading	42
4.4	Korelasi Perpindahan Massa.....	44
4.5	Analisis Hasil Percobaan.....	48
BAB V KESIMPULAN		52
DAFTAR PUSTAKA		xv
LAMPIRAN A		xviii
DATA PENELITIAN		xviii
A.1	Studi Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Diethanolamine (DEA) ..	xviii
A.2	Studi Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Campuran Monoethanolamine (MEA) dan Diethanolamine (DEA)	xviii
LAMPIRAN B.....		xix
CONTOH PERHITUNGAN.....		xix

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Pengaruh laju alir pelarut terhadap konsentrasi CO ₂ yang terabsorp	11
Gambar 2.2 Perpindahan massa pada membran.	12
Gambar 2.3 Skema aliran membran.....	13
Gambar 2.4 Struktur kimia membran PVC	13
Gambar 2.5 Sistematis Diagram Kontaktor Membran	14
Gambar 2.6 Prinsip Absorpsi pada Kontaktor Membran	15
Gambar 2.7 Kontaktor membran serat berongga.....	16
Gambar 2.8 Daerah Perpindahan Massa pada Absorpsi CO ₂	20
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 3.2 Skema alat penelitian	28
Gambar 4.1 Skema perpindahan molekul CO ₂ ke dalam fasa liquid.....	32
Gambar 4.2 Fenomena difusi fasa gas ke dalam fasa liquid.....	33
Gambar 4.3 Pengaruh kecepatan linier pelarut DEA terhadap koefisien perpindahan massa.....	34
Gambar 4.4 Pengaruh kecepatan linier pelarut MEA/DEA terhadap koefisien perpindahan massa.....	35
Gambar 4.5 Pengaruh laju alir pelarut DEA terhadap fluks perpindahan massa.....	36
Gambar 4.6 Pengaruh laju alir pelarut MEA/DEA terhadap fluks perpindahan massa.....	37
Gambar 4.7 Pengaruh jumlah serat (N) dalam modul terhadap koefisien perpindahan massa untuk pelarut DEA	38
Gambar 4.8 Pengaruh jumlah serat (N) dalam modul terhadap koefisien perpindahan massa untuk pelarut MEA/DEA.....	38
Gambar 4.9 Pengaruh jumlah serat (N) dalam modul terhadap kapasitas penyerapan untuk pelarut DEA	39
Gambar 4.10 Pengaruh jumlah serat (N) dalam modul terhadap kapasitas penyerapan untuk pelarut MEA/DEA	40

Gambar 4.11 Nilai koefisien perpindahan massa CO ₂ dengan laju alir pelarut untuk setiap jenis pelarut pada jumlah serat 40	41
Gambar 4.12 Pengaruh laju alir pelarut terhadap % <i>acid loading</i> untuk pelarut DEA	43
Gambar 4.13 Pengaruh laju alir pelarut terhadap % <i>acid loading</i> untuk pelarut MEA/DEA	44
Gambar 4.14 Perbandingan bilangan reynolds terhadap sherwood pada variasi jumlah serat untuk pelarut DEA.....	45
Gambar 4.15 Perbandingan bilangan reynolds terhadap sherwood pada variasi jumlah serat untuk pelarut MEA/DEA	45
Gambar 4.16 Diagram neraca massa CO ₂ untuk pelarut campuran MEA/DEA pada laju alir 400 ml/menit dan jumlah serat 40	48
Gambar 4.17 Pengaruh laju alir pelarut campuran MEA/DEA terhadap persentase CO ₂ yang terbsorpsi.....	51



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan sifat / karakteristik MEA, DEA, dan MDEA.....	10
Tabel 2.2 . <i>State of The Art</i>	23
Tabel 4.1 Perbandingan nilai b pada masing-masing jumlah serat untuk pelarut DEA.....	46
Tabel 4.2 Perbandingan nilai kemiringan pada masing-masing jumlah serat untuk pelarut MEA/DEA.....	47
Tabel 4.3 Perhitungan neraca massa pelarut DEA.....	49
Tabel 4.4 Perhitungan neraca massa pelarut MEA/DEA.....	50

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
k_L	Koefisien / laju perpindahan massa	cm/s
Q_L	Laju alir pelarut	m ³ /s
A	Luas permukaan membran keseluruhan	m ²
C^*	Kelarutan gas CO ₂ dalam absorben	mol/L
C_0	Konsentrasi awal CO ₂ dalam absorben	mol/L
C_1	Konsentrasi akhir CO ₂ dalam absorben	mol/L
n_f	Jumlah serat	-
d_f	Diameter serat	m
L	Panjang modul HFMM	m
$K_a \text{ CO}_2$	Konstanta kesetimbangan CO ₂	mol/L
T_0	Suhu awal	K
T^0	Suhu standard (ruang)	K
T_1	Suhu akhir	K
k_H	Konstanta Henry	-
P	Tekanan operasi	atm
J	Fluks perpindahan massa	mol/(m ² .s)
ΔC	Beda konsentrasi	mol/L
Sh	Bilangan Sherwood	-
Re	Bilangan Reynold	-

d_e	Diameter ekivalen	m
D	Difusivitas CO_2	m^2/s
ϵ	Faktor kekosongan	-
ρ	Massa jenis gas CO_2	kg/m^3
v	Kecepatan aliran gas	m/s
μ	Viskositas gas CO_2	cP



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Gas alam merupakan sumber energi kedua terbesar setelah minyak bumi dan harganya pun lebih stabil dibandingkan minyak bumi. Berdasarkan data yang ada, status jumlah cadangan terbukti maupun potensial gas di Indonesia mencapai 153,72 triliun kaki kubik (BPMIGAS 2011). Volume ini diperkirakan akan mampu memenuhi kebutuhan hingga 46 tahun ke depan. Dibandingkan dengan cadangan minyak bumi Indonesia hanya 7,41 milyar barrel yang akan habis dikonsumsi sekitar 12 tahun lagi. Oleh karena itu, potensi gas alam dari lahan kerja eksplorasi maupun pengolahan perlu dikembangkan lebih lanjut sehingga terjaminnya kebutuhan energi di Indonesia pada masa depan.

Gas alam hasil eksplorasi mengandung gas CO_2 yang tergolong merugikan. Dalam industri gas di Indonesia, gas alam di Cepu memiliki kandungan CO_2 sekitar 30% dan di Natuna sekitar 70%. Gas tersebut bersifat korosif dan dapat merusak bagian dalam utilitas pabrik dan sistem perpipaannya. Gas CO_2 akan bersifat korosif jika di dalam gas alam terkandung uap air yang dapat mengasamkan CO_2 menjadi H_2CO_3 . Sifat korosif CO_2 akan muncul pada daerah-daerah yang menyebabkan penurunan temperatur dan tekanan, seperti pada bagian *elbow* pipa *tubing-tubing*, *cooler*, dan injektor turbin. Sebagai contoh di dalam fasilitas turbin gas, CO_2 akan mengakibatkan penurunan nilai kalor pembakaran karena CO_2 dan H_2O merupakan produk dari pembakaran sehingga CO_2 dan H_2O tidak dapat dibakar. Menurunnya kalor pembakaran akan mengurangi tegangan listrik yang dihasilkan oleh turbin gas tadi. Contoh lain misalnya dalam proses pencairan gas alam, CO_2 bersifat merugikan, karena pada suhu sangat rendah CO_2 akan menjadi padat (*icing*) (D. Dortmund 1999), sehingga mengakibatkan tersumbatnya sistem perpipaan dan merusak *tubing-tubing* pada alat penukar panas utama (*main heat exchanger*). Melihat dari permasalahan CO_2 sebagai gas yang merugikan, proses pemisahan gas CO_2 dalam

pengolahan gas alam menjadi hal yang penting dilakukan dan harus dipertimbangkan keekonomisannya.

Sekarang ini banyak jenis teknologi pemisahan CO₂ yang dilakukan di dalam industri gas alam yaitu absorpsi secara fisik dan kimia, teknologi membran, adsorpsi, dan pemisahan secara *cryogenic*. Dari metode tersebut, teknologi yang dikenal paling efektif sehingga banyak digunakan adalah teknologi absorpsi menggunakan kolom konvensional. Namun teknologi ini memiliki kekurangan dalam proses operasinya. Kolom konvensional akan sulit dibersihkan jika terdapat kotoran dan padatan di dalamnya. Selain itu, fenomena peluapan (*flooding*) jika laju alir terlalu besar dan penumpukan (*loading*) jika laju alir terlalu kecil merupakan salah satu kendala dalam kolom konvensional. Ukuran kolom yang akan dibuat akan membuat biaya dalam proses ini tidak ekonomis (Sutrasno Kartohardjono 2007). Melihat kondisi ini, alternatif teknologi pemisahan lain yang lebih ekonomis dan efektif perlu dicari dan dikembangkan lebih lanjut.

Beberapa tahun terakhir ini, teknologi membran sebagai kontaktor gas-cair sedang dikembangkan sebagai alternatif pemisahan CO₂ dalam gas alam (Zhang Qi 1985; Rangwala 1996; D. Q. Zhang 1997) karena proses yang ekonomis dan efektif. Teknologi ini memiliki luas kontak daerah per unit volum yang sangat besar dan biaya yang murah dibandingkan dengan kolom konvensional (Rangwala 1996). Membran yang digunakan ini bersifat hidrofobik agar air tidak membasahi membran saat terjadi proses kontak. Selain itu, kontaktor membran memiliki beberapa keuntungan lain seperti konsumsi energi yang relatif lebih rendah, fleksibelnya membran untuk disusun, dan laju alir dapat divariasikan secara bebas sehingga kendala *flooding* dan *loading* pada kolom packing dapat ditanggulangi. Kontaktor membran juga tidak mencemari lingkungan karena tidak ada zat aditif yang digunakan dalam membran serta tidak boros dalam pemakaian pelarut (A. Gabelman 1999). Selain itu, keuntungan lainnya adalah tidak diperlukannya perbedaan densitas antara kedua fluida dan tidak terbentuk emulsi (*foaming*). Pada prinsipnya, teknologi membran sebagai kontaktor adalah terjadinya perpindahan massa yang bukan disebabkan karena gaya pendorong (*driving force*) seperti perbedaan tekanan dan konsentrasi. Pada kontaktor membran, tidak terjadi sistem dispersi dari fasa satu ke fasa lainnya serta tidak terjadinya kontak langsung antara

fasa cair dan gas. Pelarut dialirkan pada sisi membran sedangkan fluida yang akan dihilangkan dialirkan di sisi membran lainnya.

Kontaktor membran yang mulai dikembangkan beberapa tahun terakhir adalah kontaktor membran serat berongga. Kontaktor ini mempunyai luas permukaan kontak sekitar seribu kali dari luas permukaan kontak pada kolom konvensional. Selain itu bahan dari membran ini adalah polipropilen karena harganya yang ekonomis dan sifatnya yang hidrofobik sehingga air tidak membasahi membran saat terjadi proses kontak. Dasar pemisahan CO_2 melalui kontaktor membran serat berongga didasari pada permeabilitas membran dan difusivitas pada gas yang dialirkan. Variabel jumlah serat, diameter serat, dan laju alir pelarut merupakan faktor penting dalam proses pemisahan (Hong-Yan Zhang 2006).

Banyak studi yang telah dilakukan yang menggunakan kontaktor membran serat berongga sebagai kontaktor gas-cair untuk proses penyerapan gas CO_2 ke dalam berbagai pelarut. Pada tahap awal, penelitian tentang absorpsi gas CO_2 dalam kontaktor membran serat berongga menghasilkan kesimpulan bahwa efisiensi pemisahan CO_2 berbanding lurus dengan laju alir absorben yang dialirkan (Young-Seok Kim 2000). Hal ini dikarenakan bertambah banyaknya jumlah molekul pelarut yang dapat menyerap CO_2 . Selain itu, dengan laju alir yang tinggi, tahanan perpindahan massa pada fasa cair tidak ada lagi sehingga hanya bergantung pada membran dan fasa gas. Dalam pemilihan pelarut sebagai faktor yang penting, penelitian dan simulasi daya absorpsi CO_2 pada kontaktor membran berongga dapat dilakukan dengan pelarut diethanolamine (DEA), 2-amino-2-metil-1propanol (AMP), dan metil diethanolamine (MDEA) (R. Wang 2003). Sebuah penelitian (Yanwen Gong 2006) menyatakan bahwa dalam pemilihan pelarut, campuran pelarut amina lebih baik daripada monoamina sehingga penelitian ini akan menggunakan larutan penyerap campuran senyawa amina. Dari banyaknya penelitian menggunakan pelarut amine, MEA, DEA, dan MDEA menjadi pelarut yang efektif digunakan. MEA merupakan pelarut yang memiliki kecepatan absorpsi yang terbaik di antara ketiganya yaitu senyawa yang sangat cepat mengikat dan bereaksi dengan CO_2 membentuk senyawa lain. DEA merupakan pelarut yang sedikit korosif dan mempunyai daya absorpsi yang cukup

baik dan MDEA merupakan pelarut yang tidak korosif namun kemampuan absorpsinya tidak lebih besar dari MEA dan DEA (Saeid Rajabzadeha 2009). Dari ketiga sifat pelarut amina tersebut, terlihat bahwa MEA dan DEA adalah campuran amina yang baik untuk menghindari adanya korosif dan mendapatkan daya absorpsi yang baik. Oleh karena itu, melihat dari perkembangan pelarut yang digunakan selama ini, penelitian kali ini akan mengembangkan metode absorpsi CO₂ dengan menggunakan campuran pelarut amina yaitu MEA dan DEA dengan kontaktor membran serat berongga.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini meninjau bagaimana pengaruh variasi laju alir pelarut terhadap efektivitas proses absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga. Pelarut yang digunakan adalah larutan penyerap campuran senyawa amina MEA/DEA dan senyawa amina tunggal DEA sebagai pembandingnya pada jumlah serat yang divariasikan. Parameter efektivitas dianalisis berdasarkan studi perpindahan massa dan hidrodinamika

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas kontaktor membran serat berongga dalam menyerap gas CO₂ menggunakan pelarut campuran senyawa amina. Senyawa amina yang digunakan dalam studi ini adalah MEA dan DEA.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Modul membran serat berongga yang terbuat dari PVC sebagai kontaktor gas-cair dengan diameter dan panjang serat yang tetap.
2. Pelarut yang digunakan mengandung campuran MEA/DEA dan pelarut tunggal DEA.
3. Gas yang digunakan adalah CO₂ murni.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan makalah ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi dasar teori yang digunakan untuk menjelaskan masalah

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berisi tentang metode yang digunakan dalam penelitian ini.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang pembahasan hasil penelitian dan analisis-analisis terhadap hasil penelitian tersebut.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dan saran yang dapat diambil berdasarkan percobaan yang dilakukan terkait dengan tujuan dari penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gas CO₂ dalam Gas Alam

Dalam gas alam, CO₂ merupakan salah satu komponen yang tidak diharapkan karena sifatnya yang merugikan. Oleh karena itu, proses pemisahan gas CO₂ dalam gas alam perlu dilakukan agar mendapatkan nilai gas alam yang ekonomis.

2.1.1 Sifat Gas CO₂

Gas CO₂ merupakan suatu senyawa yang terdiri dari unsur karbon dan oksigen. Dalam tekanan atmosfer senyawa ini berbentuk fasa gas. Secara kimia, gas CO₂ bersifat sedikit asam dan tidak dapat terbakar. Selain itu, sifat fisik gas CO₂ adalah tidak berwarna, tidak berbau dan mampu meningkatkan suhu pada suatu lingkungan yang saat ini dikenal dengan efek rumah kaca. Di troposfer, hidrokarbon melalui reaksi yang rumit akan terbentuk menjadi CH₄ dan CH₄ menjadi CO dan selanjutnya menjadi CO₂. Oleh karena itu, penggunaan gas alam sebagai sumber energi menimbulkan pengaruh negatif pada lingkungan seperti pemanasan global. Selain itu gas CO₂ juga sangat merugikan karena merupakan toksik bagi kesehatan makhluk hidup.

2.1.2 Pengaruh CO₂ dalam Gas Alam

Gas CO₂ dalam gas alam merupakan salah satu pengotor utama. Jumlah gas CO₂ dalam gas alam berbeda-beda tergantung dari jenis reservoirnya. Sebagai contoh, lapangan penghasil gas alam yang terbesar di Indonesia, Natuna, memiliki kandungan gas CO₂ sebesar 70%. Padahal potensi gas alam yang dapat diproduksi dapat mencapai 46 tcf atau setara dengan 8.383 miliar barel minyak bumi. Di Cepu, lapangan penghasil gas alam sebesar 150 MMSCFD ini diperkirakan mengandung gas CO₂ sebesar 30% atau sekitar 44 MMSCFD CO₂. Di lapangan Tangguh, gas alam yang konstan menghasilkan 2,9 miliar TSCF mengandung sekitar 12,5 % CO₂. Oleh karena itulah, keberadaan CO₂ di sumur gas alam

Indonesia sangat memengaruhi prospek signifikansi gas alam beberapa waktu ke depan. Beberapa kerugian yang disebabkan gas CO₂ pada gas alam :

- a. Sifat gas CO₂ korosif ketika bereaksi dengan air. Sifatnya yang korosif akan merusak bagian utilitas pabrik dan unit perpipaannya. Asam H₂CO₃ akan terbentuk ketika gas CO₂ bereaksi dengan air yang merupakan salah satu senyawa dalam gas alam.
- b. Pada suhu rendah dapat berubah menjadi padat (*icing*) sehingga mengakibatkan tersumbatnya sistem perpipaan dan merusak *tubing-tubing* pada alat penukar panas utama (*main heat exchanger*).
- c. CO₂ akan mengakibatkan penurunan nilai kalor pembakaran karena CO₂ dan H₂O merupakan produk dari pembakaran sehingga CO₂ dan H₂O tidak dapat dibakar. Menurunnya kalor pembakaran akan mengurangi tegangan listrik yang dihasilkan oleh turbin gas.

Dari pemaparan di atas, dapat disimpulkan bahwa keberadaan CO₂ dalam gas alam sangat merugikan dan diperlukan proses pemisahannya dari gas alam sebelum dijual ke pasar.

2.2 Absorpsi CO₂

Absorpsi adalah proses pemisahan bahan dari suatu campuran gas dengan cara pengikatan bahan tersebut pada permukaan absorben cair yang diikuti dengan pelarutan. Secara umum, faktor-faktor yang memengaruhi absorpsi adalah kelarutan (*solubility*) gas dalam pelarut dalam kesetimbangan, tekanan operasi, temperatur, jenis absorben dan laju alirnya.

2.2.1 Proses Absorpsi CO₂

Pada absorpsi CO₂, kelarutan gas yang akan diserap dapat disebabkan hanya oleh gaya-gaya fisik (pada absorpsi fisik) atau selain gaya tersebut juga oleh ikatan kimia (pada absorpsi kimia). Komponen gas yang dapat mengadakan ikatan kimia akan dilarutkan lebih dahulu dan juga dengan kecepatan yang lebih tinggi. Aplikasi dari absorpsi fisik adalah proses absorpsi CO₂ oleh air, dimana CO₂ akan berdifusi ke dalam air tanpa terjadi reaksi kimia. Absorpsi CO₂ ke dalam air adalah proses yang dijadikan sebagai pembanding dalam menggunakan pelarut lain sebagai absorben. Pada dasarnya, CO₂ tetap bereaksi dengan air,

dimana reaksi yang terjadi adalah reaksi kesetimbangan dan konstanta kesetimbangan yang terjadi sangat kecil. Oleh karena itu, reaksi kimia antara CO₂ dan air dapat diabaikan. Reaksi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut (Young-Seok Kim 2000) :



Absorpsi gas CO₂ dengan pelarut senyawa amina adalah absorpsi kimia, dimana terjadi reaksi kimia antara CO₂ dengan senyawa amina (Xu Shuo 1996): Reaksi antara MEA atau DEA (R₁R₂NH) dengan CO₂ secara umum digambarkan oleh mekanisme *Zwitter-ion* yang terdiri atas dua tahap :



Dimana R₁ adalah sebuah kumpulan alkil dan R₂ adalah H untuk MEA dan kumpulan alkil untuk DEA. Reaksi tersebut telah diterima secara umum sebagai mekanisme reaksi antara gas CO₂ dengan amina sekunder, seperti MEA dan DEA (Jimmy Xiao 2000).

Pada industri, absorpsi CO₂ biasanya dilakukan pada kolom absorpsi yang besar. Kolom absorpsi adalah sebuah kolom, dimana ada zat yang berbeda fase mengalir berlawanan arah yang dapat menyebabkan komponen kimia ditransfer dari satu fase cairan ke fase lainnya, terjadi hampir pada setiap reaktor kimia. Proses ini dapat berupa absorpsi gas, destilasi, pelarutan yang terjadi pada semua reaksi kimia. Namun, banyak kekurangan yang terdapat dalam teknologi ini seperti *foaming*, *flooding*, dan *loading* sehingga diperlukan teknologi lain yang lebih efisien dan ekonomis. Oleh karena itu, sekarang ini proses absorpsi CO₂ sedang dikembangkan menggunakan kontaktor membran serat berongga seperti yang dikerjakan dalam penelitian ini.

2.2.2 Pelarut dalam Absorpsi CO₂

Pelarut merupakan salah satu variabel penting dalam proses absorpsi CO₂. Berikut adalah beberapa syarat dalam pemilihan pelarut dalam absorpsi (Xu Shuo 1996) :

1. Memiliki daya melarutkan bahan yang akan diabsorpsi yang sebesar mungkin (kebutuhan akan cairan lebih sedikit, volume alat lebih kecil).
2. Selektif
3. Memiliki tekanan uap yang rendah
4. Tidak korosif.
5. Mempunyai viskositas yang rendah
6. Stabil secara termis.
7. Murah

Jenis pelarut yang paling banyak digunakan dalam industri proses absorpsi CO₂ adalah pelarut senyawa amina. Pelarut ini memiliki kecepatan reaksi yang tinggi (Mulder 1997). Senyawa gugus amina terdiri dari beberapa macam yaitu monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA), N-methyldiethanolamine (MDEA), dan 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) (R. Wang 2003). Larutan MEA sering digunakan untuk menghilangkan gas CO₂ dari gas alam dan proses penyulingan. Larutan ini merupakan basa kuat yang bereaksi dengan cepat dengan CO₂ sehingga menghasilkan konsentrasi CO₂ yang kecil. Larutan MEA merupakan larutan yang paling ekonomis dibandingkan larutan yang lain dan mempunyai kemampuan absorpsi yang paling baik diantara semua pelarut amina. Namun, jumlah MEA yang digunakan perlu dipertimbangkan mengingat sifatnya yang korosif sehingga merugikan kolom absorpsi. Sementara DEA merupakan larutan yang moderat, tidak terlalu korosif dan tidak terlalu mahal. Selain itu DEA memiliki tekanan uap yang cukup rendah sehingga penggunaan pelarut ini dapat dilakukan secara efektif (Saeid Rajabzadeha 2009). Senyawa MDEA merupakan senyawa yang kemampuan absorpsinya paling rendah. Namun senyawa ini mudah diregenerasi sehingga dianggap ekonomis walaupun harganya paling mahal diantara senyawa sejenisnya.

Sebuah penelitian menyimpulkan bahwa efektivitas absorpsi dengan campuran pelarut amina akan lebih baik dari monoamina (C.H. Liao 2002; Lu

Jian-gang 2009). MEA/DEA merupakan pelarut senyawa amina yang baik jika dilakukan dalam absorpsi. Sebuah penelitian menyatakan bahwa efektivitas absorpsi akan lebih baik jika konsentrasi MEA dalam campuran dinaikkan dan laju alir absorben dinaikkan. Namun keberadaan MEA dalam campuran merugikan karena sifatnya yang sangat korosif sehingga campuran MEA dan DEA menjadi alternatif pelarut karena kelebihan-kelebihannya yang telah dipaparkan dibagian atas, Oleh karena itu, penelitian ini akan menggunakan pelarut campuran senyawa amina MEA/DEA seperti yang dikerjakan pada penelitian lain.

Tabel 2.1 Perbandingan sifat / karakteristik MEA, DEA, dan MDEA

No	Sifat / Karakteristik		
	MEA	DEA	MDEA
1	Senyawa amina yang paling ekonomis	Harganya tidak terlalu mahal	Harganya paling mahal diantara MEA dan DEA
2	Memiliki sifat yang reaktif dengan CO ₂ , namun korosif	Merupakan senyawa yang moderat dan tidak terlalu korosif	Tidak korosif
3	Memiliki tekanan uap yang paling tinggi diantara DEA dan MDEA	Memiliki tekanan uap yang cukup rendah	Mudah diregenerasi sehingga cukup ekonomis

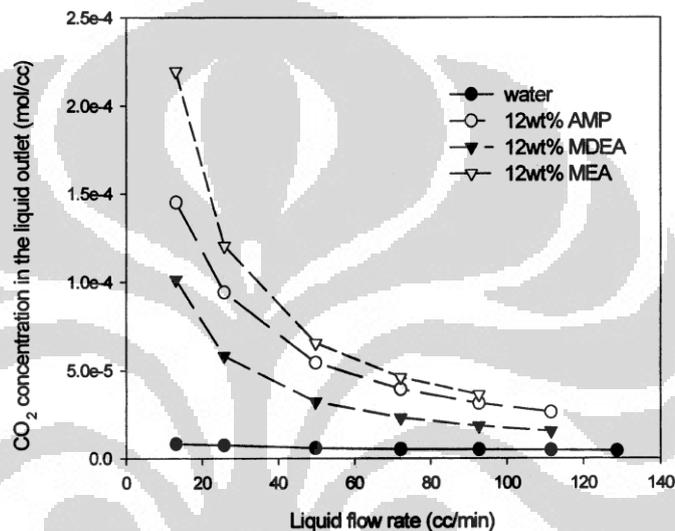
Tabel di atas adalah perbandingan dari ketiga senyawa amina tersebut [(Young-Seok Kim 2000; Lu Jian-gang 2009; R. Wang 2003)].

. Laju alir pelarut merupakan salah satu faktor yang memengaruhi efektivitas absorpsi gas CO₂. Koefisien perpindahan massa, salah satu parameter yang menunjukkan efektivitas absorpsi, memiliki persamaan seperti terlihat di bawah yang menunjukkan bahwa koefisien tersebut berbanding lurus dengan laju alir pelarut yang dialirkan.

$$k_L = \frac{Q_L}{A_m} \ln \frac{C^* - C_0}{C^* - C_0} \quad (2.4)$$

Dengan k_L adalah koefisien perpindahan massa (m/s) dan Q_L adalah laju alir volumetrik pelarut (L/jam).

Pada proses absorpsi CO_2 yang terjadi pada kontaktor membran serat berongga, laju alir pelarut merupakan salah satu variabel yang penting. Pada sebuah penelitian pengaruh efektivitas absorpsi dalam kontaktor membran serat berongga akan mengalami kenaikan apabila laju alir pelarut amina dinaikkan. Hal ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.1. Pengaruh laju alir pelarut terhadap konsentrasi CO_2 yang terabsorpsi (Young-Seok Kim 2000)

Kenaikan laju alir pelarut akan menaikkan gradien konsentrasi antara gas dan larutan sehingga CO_2 yang terabsorpsi juga akan lebih banyak. Selain itu, tingginya laju alir pelarut akan membuat aliran semakin turbulen yang secara studi hidrodinamika akan membuat efektivitas perpindahan massa akan semakin besar.

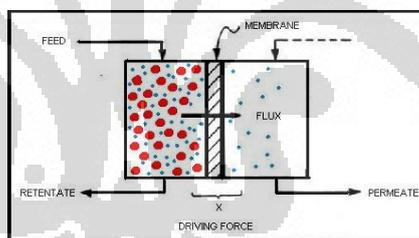
2.3 Teknologi Membran

Definisi membran secara umum adalah suatu penghalang selektif di antara dua fase, dimana suatu spesi molekul dapat melalui membran sedangkan spesi molekul lainnya tidak. Pemisahan terjadi karena ukuran pori membran hanya dapat dilalui oleh molekul yang mempunyai ukuran tertentu (lebih kecil dari pori membran) sedangkan molekul yang ukurannya lebih besar tidak dapat melewati membran. Selain itu, pemisahan juga terjadi dikarenakan adanya perbedaan

ukuran pori membran, sifat molekul tersebut, maupun sifat membran itu sendiri (R. Wang 2005).

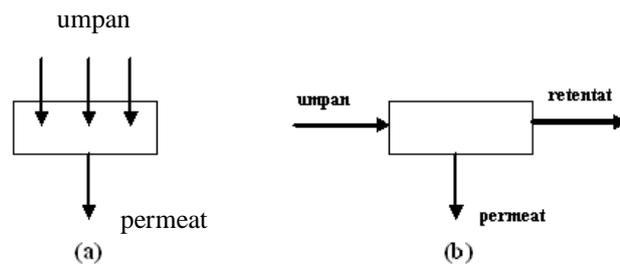
2.3.1 Proses pemisahan dengan Teknologi Membran

Laju perpindahan massa pada membran ditentukan oleh permeabilitasnya di dalam membran dan gaya pendorong atau gaya penggerak (*driving force*) yang bekerja pada molekul tersebut, yang dapat berupa perbedaan tekanan, konsentrasi, temperatur di antara fluida pada membran, dan potensial listrik antara larutan pada bagian luar membran dengan larutan yang berada pada bagian dalam membran. Perpindahan massa dalam membran dengan pengaruh *driving force* dapat dilihat pada gambar 2.2. Besar laju perpindahan komponen-komponen yang akan dipisahkan sebanding dengan besarnya gaya penggerak yang ada. Permeabilitas membran ditentukan oleh konsentrasi dan mobilitas komponen dalam struktur membran. Semakin tebal membran, maka tahanan terhadap perpindahan massanya semakin besar sehingga laju permeasi yang diperoleh rendah.



Gambar 2.2 Perpindahan massa pada membran.
(Mulder, 1997)

Secara umum, jenis aliran umpan yang melalui membran dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu aliran *dead-end* dan aliran *cross-flow* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3. Aliran *dead-end* adalah jenis aliran dimana aliran umpan tegak lurus dengan membran dan tidak terdapat aliran keluaran partikel yang tertolak membran, sehingga akan menyebabkan akumulasi pada permukaan membran yang semakin lama semakin tebal (pembentukan *cake*), yang dapat mengakibatkan laju permeasi akan berkurang. Sementara itu, aliran *cross-flow* adalah jenis aliran dimana aliran umpan sejajar dengan permukaan membran. Aliran ini paling sering digunakan di industri karena lebih fleksibel dan pencucian membran tidak terlalu sering.

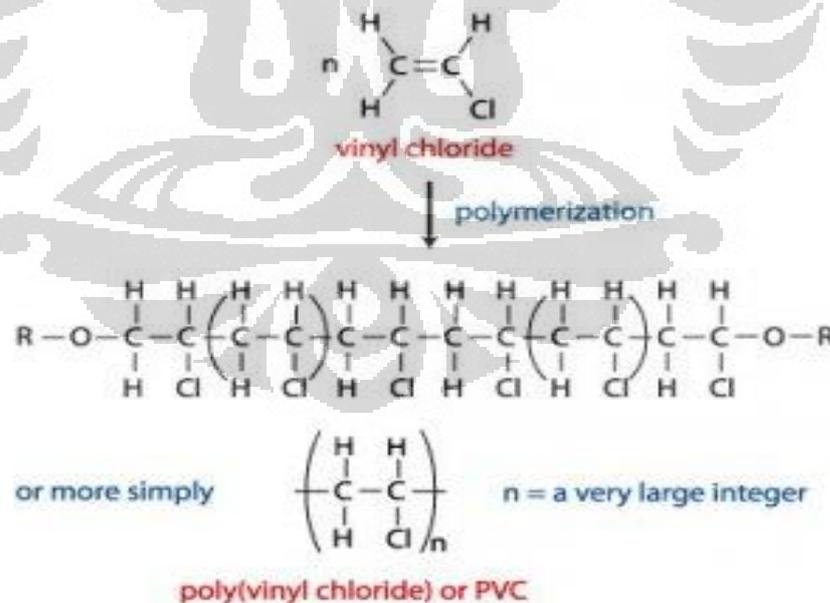


Gambar 2.3 Skema aliran membran: (a) *dead-end* dan (b) *cross-flow*.

(Mulder, 1996)

2.3.2 Membran Berstruktur PVC

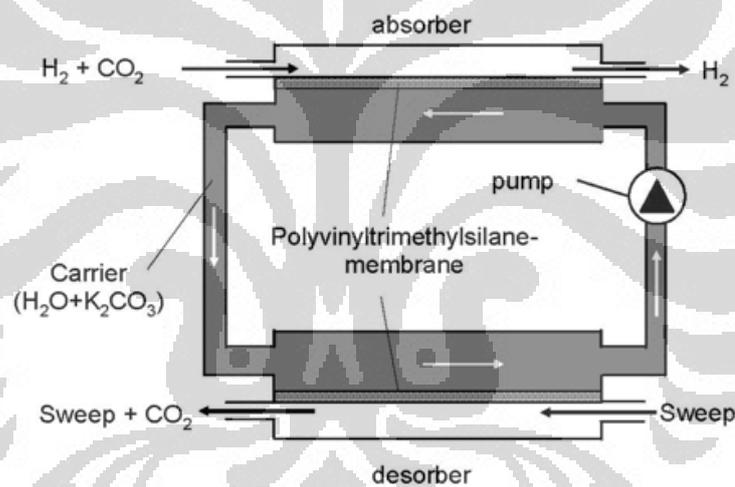
Pada penelitian kali ini, membran yang digunakan adalah membran sintetik yang terbuat dari salah satu jenis polimer, yaitu PVC. Polivinil klorida (PVC) merupakan salah satu polimer adisi sintetik yang banyak dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari. PVC adalah bahan yang cukup kuat untuk digunakan sebagai membran dengan kondisi laju alir yang tinggi. PVC bersifat inert terhadap bahan kimia sehingga tidak mengganggu reaksi antara CO_2 dengan absorben senyawa amina pada proses absorpsi. Gambar 2.5 berikut menggambarkan struktur dari monomer dan polimer PVC.



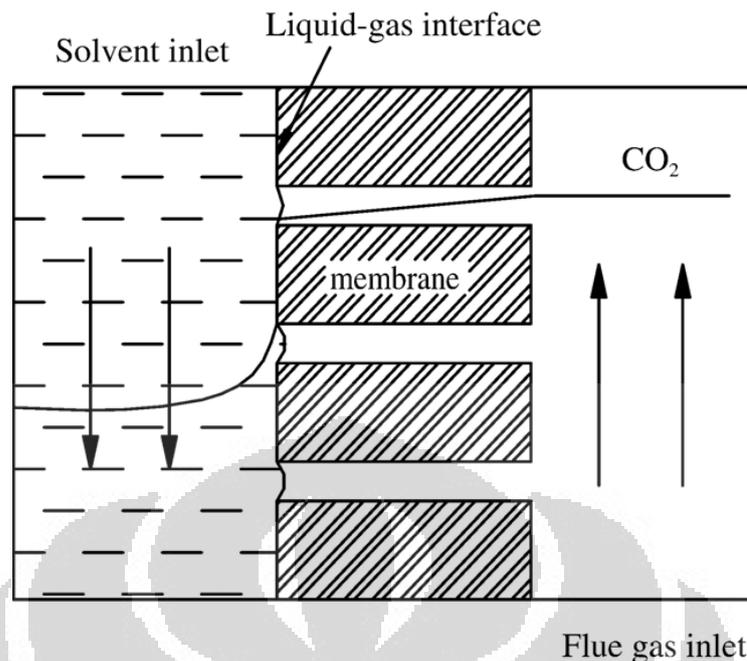
Gambar 2.4 Struktur kimia membran PVC

2.3.3 Kontakor Membran

The A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian Academy of Sciences, Moscow (TIPS), mula-mula mengembangkan sistem kontakor membran untuk sistem purifikasi campuran gas pada struktur biologi. Sistem ini merupakan kombinasi dari sistem membran dan absorpsi. Absorber dan desorber dari sistem ini adalah modul membran itu sendiri yang dialiri cairan dimana dibutuhkan energi untuk mensirkulasi cairan. Pada CO₂, gas alam masuk ke membran lalu CO₂ masuk ke dalam absorber melalui membran sebagai permeate, dan gas lain tertolak sebagai aliran retentate. Lalu aliran permeate (CO₂) diabsorpsi oleh pelarut lalu di desorpsi melalui modul membran. Sistem diagram kontakor membran (Shui-ping Yan 2007) dan aliran pada absorpsi dapat dilihat pada gambar 2.7 dan 2.8.



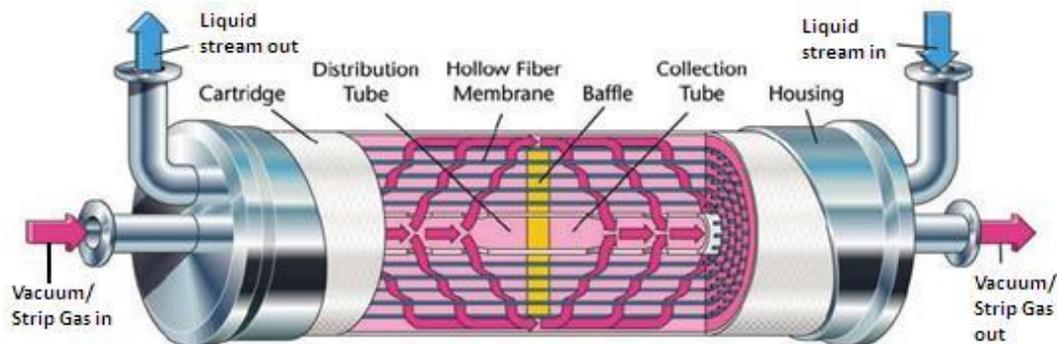
Gambar 2.5 Sistematis Diagram Kontakor Membran



Gambar 2.6. Prinsip Absorpsi pada Kontaktor Membran

2.3.4 Absorpsi CO₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga

Penggunaan kontaktor membran serat berongga merupakan proses membran yang relatif baru. Kontaktor membran serat berongga, yang memiliki struktur seperti gambar 2.9 menggunakan membran serat berongga (*hollow fiber*) sebagai pemisah antar fasa satu dengan fasa lainnya. Struktur modul membran serat berongga mirip dengan modul kapiler tetapi yang berbeda adalah dimensinya. Struktur serat di dalam modul yang asimetrik memiliki diameter dalam sekitar 42 mikron (0.0016 inci) dan diameter luar sekitar 85 mikron (0.0033 inci). Jutaan serat ini akan dibentuk menjadi bundel dan dilipat setengah dengan konfigurasi kerapatan pengepakan yang paling tinggi mencapai 30000 m²/m³. Distribusi air umpan berupa tabung plastik perforasi (*perforated plastic tube*) dimasukkan ke dalam pusatnya untuk memperluas panjang keseluruhan dari benda. Kemudian bundel dibungkus dan kedua sisi ditutup sehingga membentuk lembaran. Modul membran serat berongga mempunyai diameter 10-20 cm (4-8 inci) yang terdapat dalam *shell* silinder dengan panjang kurang lebih 137 cm (54 cm) dan diameter 15-30 cm (6-12 inci). Keseluruhan proses penggabungan tersebut disebut sebagai permeator.



Gambar 2.7. Kontakor membran serat berongga.

(Fried Wiesler, Membran, 2003)

Unit *hollow fiber* dapat beroperasi pada aliran non-turbulen atau laminar dan juga dapat digunakan dengan berbagai orientasi aliran (berlawanan arah atau searah) dan flat vertikal ataupun horizontal. Modul serat berongga membutuhkan umpan air dengan kualitas yang lebih baik (konsentrasi padatan yang rendah) dibandingkan konfigurasi modul *spiral wound* karena sangat rentan terhadap *fouling* akibat banyaknya lubang (atau rongga) pada modul ini. Modul ini juga tidak tahan terhadap tekanan dan temperatur tinggi.

Keunikan dari kontakor ini adalah membran yang digunakan tidak selektif dan non-dispersif sehingga tidak mempengaruhi koefisien partisi. Dengan kontakor ini, perbedaan konsentrasi merupakan gaya penggerak (*driving force*) yang paling berpengaruh dalam proses pemisahan jika dibandingkan dengan perbedaan tekanan sehingga hanya diperlukan perbedaan tekanan yang kecil pada membran untuk membuat interfasa gas-cair berada tetap tidak bergerak pada mulut pori.

Fungsi utama membran dalam kontakor membran serat berongga adalah untuk menciptakan luas permukaan kontak yang sangat besar di dalam modul sehingga proses perpindahan massa yang terjadi akan lebih efisien. Selain itu membran serat berongga juga digunakan untuk membuat fasa kontak gas cair pada pori membran tidak bergerak dengan kombinasi efek tegangan permukaan dan perbedaan tekanan pada tiap fasa.

Keuntungan kontaktor membran serat berongga sebagai kontaktor gas-cair dibandingkan dengan peralatan separasi konvensional antara lain yaitu :

1. Sistem kontak bersifat non-dispersif sehingga memudahkan kontrol terpisah dari laju alir fasa gas dan cairan.
2. Tidak diperlukan adanya perbedaan densitas antar fluida karena kontaktor membran dapat mengakomodir fluida dengan densitas yang sama dan sekaligus dapat dioperasikan pada berbagai orientasi (vertikal atau horizontal, baik searah maupun berlawanan arah).
3. Tidak terjadi pembentukan emulsi (*foaming*) karena tidak ada dispersi antar fluida.
4. Luas permukaan yang ada tidak mempengaruhi variasi laju alir (baik tinggi maupun rendah) karena kedua aliran tidak bergantung satu sama lain. Hal ini merupakan suatu kelebihan yang vital dalam proses industri ketika rasio pelarut terhadap umpan yang diperlukan sangat tinggi ataupun sangat rendah. Jika kondisi yang sama diterapkan dalam kolom *ber-packing* maka dapat terjadi *flooding* pada saat laju alir gas terlalu tinggi relatif terhadap laju alir air, sebaliknya bila laju alir gas terlalu rendah relatif terhadap laju alir air maka dapat terjadi *unloading*.
5. Efisiensi yang diperoleh lebih tinggi (dengan pengukuran *HTU-Height of Transfer Unit* yang rendah).
6. Luas permukaan kontak yang lebih besar daripada separasi konvensional, kira-kira dapat memberikan luas permukaan 30 kali lebih besar daripada *gas absorber* dan 500 kali lebih besar daripada kolom ekstraksi cair-cair.
7. Penskalaan hasil lebih linier sehingga peningkatan kapasitas dapat diprediksi secara sederhana dengan hanya menambahkan modul membran (dibatasi oleh spesifikasi peralatan pendukung seperti pompa transfer, perpipaan, dan lain-lain).
8. Tidak terjadi pemborosan pelarut sehingga efisien dan efektif dalam pemanfaatan pelarut.
9. Kontaktor membran juga dapat meningkatkan batas konversi kesetimbangan reaksi kimia dengan proses sirkulasi kandungan reaktor melalui kontaktor menggunakan pelarut ekstraksi atau gas desorpsi produk

dapat diambil sehingga reaksi kesetimbangan akan bergeser ke arah kanan (produk).

10. Tidak memiliki bagian yang bergerak sehingga memudahkan perawatan dan pemeliharannya.
11. Desain modularnya memperbolehkan pengaplikasian *plant* membran dalam lingkup kapasitas yang sangat luas. Baik kapasitas yang kecil maupun besar dapat dicapai dengan mudah dengan menggunakan sedikit atau banyak modul membran.
12. Biaya perawatannya rendah jika dibandingkan dengan unit operasi lainnya.
13. Kondisi operasi bebas mikroorganisme (operasi aseptik) akan menguntungkan untuk proses seperti fermentasi.

Akan tetapi kontaktor membran serat berongga juga memiliki berbagai kelemahan, diantaranya :

1. Memiliki umur tertentu sehingga biaya periodik pergantian membran juga perlu diperhitungkan.
2. Untuk membran serat berongga jenis polimer, hanya dapat beroperasi pada rentang temperatur yang tidak terlalu tinggi karena dapat merusak membran. Selain itu juga tidak tahan terhadap kondisi yang terlalu asam atau basa.
3. Adanya membran menambah tahanan lain pada perpindahan massa, yaitu tahanan membran itu sendiri. Akan tetapi tahanan ini tidak terlalu penting dan dapat dilakukan usaha untuk meminimalkan tahanan tersebut
4. Dapat terjadi *fouling* walaupun tidak sebesar pada kontaktor dengan *driving force* gradien tekanan. Selain itu, polarisasi konsentrasi (penumpukan komponen-komponen yang memiliki konsentrasi tinggi pada permukaan membran) pada permukaan membran juga mempengaruhi kekotoran pada membran sehingga kinerja operasi membran akan menurun. Kekotoran ini dipengaruhi oleh tipe pemisahan dan tipe membran yang digunakan. Berikut ini adalah tiga tipe pengotor pada peristiwa *fouling* :

- a. Endapan organik (makromolekul, zat-zat biologis dan lain-lain)

- b. Endapan anorganik (garam kalsium, hidroksi logam dan lain-lain)
- c. Partikulat

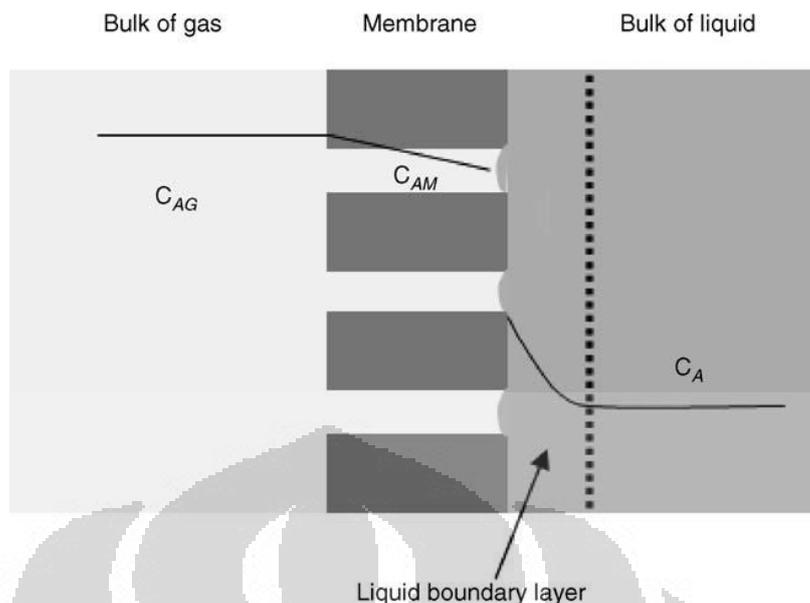
Untuk mengatasi *fouling* pada membran dapat digunakan metode koagulasi dan *backwash*.

- 5. Efisiensinya berkurang karena adanya aliran *bypass* dalam *shell* (*shell-side bypassing*) sehingga ada sebagian fluida dalam *shell* yang tidak kontak dengan membran. Oleh karena itu, aliran lebih baik dibuat menjadi turbulen.
- 6. Jumlah tahapan kesetimbangan dibatasi oleh penurunan tekanan.
- 7. Pemakaian *adhesive*/ perekat (seperti epoksi) untuk menahan "buntelan" serat pada *tube* kemungkinan mudah rusak oleh pelarut organik.

2.3.5 Studi Perpindahan Massa

Pada penelitian ini digunakan kontaktor membran serat berlubang, dengan konsentrasi CO₂ antara fasa gas dan cair sebagai gaya pendorong terjadinya perpindahan CO₂ melewati membran.

Dimana K merupakan koefisien perpindahan massa keseluruhan yang dihasilkan dari 3 buah koefisien perpindahan massa individual yaitu pada saat CO₂ menuju permukaan membran, tahanan membran, dan dari permukaan membran menuju cairan.



Gambar 2.8. Daerah Perpindahan Massa pada Absorpsi CO₂

Jumlah ketiga tahanan ini merupakan tahanan keseluruhan untuk perpindahan gas di dalam sistem kontaktor membran yang berhubungan dengan koefisien perpindahan massa seperti persamaan berikut :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{Hk_G} + \frac{3}{Hk_m} + \frac{1}{Hk_L} \quad (2.5)$$

Dengan K adalah koefisien perpindahan massa total (m.s), H adalah bilangan Henry, K_G adalah koefisien perpindahan massa fasa gas (m/s), k_m adalah koefisien perpindahan massa yang melewati membran (m/s) , dan k_L adalah koefisien perpindahan massa fasa cair (m/s)

Aliran fasa gas yang digunakan merupakan gas campuran CO₂ dan CH₄ sehingga terdapat lapisan batas pada gas. Namun perpindahan gas melalui membran dengan cara difusi melalui fasa gas jauh lebih besar dibandingkan dengan cara difusi melalui fasa cair, hal tersebut menyebabkan konsentrasi lapisan batas dapat diabaikan. Karena membran yang digunakan adalah membran hidrofobik maka pori-pori membran akan terisi gas, sehingga tahanan membran untuk perpindahan gas juga dapat diabaikan. Karena pengaruh 1/Hk_G dan 1/Hk_m terhadap proses perpindahan massa kecil, maka hanya tahanan pada cairan yang akan memiliki pengaruh yang paling besar, sehingga persamaan (2.5) dapat disederhanakan menjadi :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_L} \quad (2.6)$$

Prinsip metode yang digunakan untuk mengetahui perpindahan massa yang terjadi pada proses absorpsi gas-cair adalah dengan mengamati perbedaan konsentrasi di dalam kontaktor. Koefisien perpindahan massa yang terjadi dihitung melalui persamaan sebagai berikut :

$$k_L = \frac{Q_L}{A_m} \ln \frac{C^* - C_0}{C^* - C_1} \quad (2.7)$$

Dengan k_L adalah koefisien perpindahan massa (m/s), Q_L adalah laju alir volumetrik pelarut (L/jam), A_m adalah luas kontak perpindahan massa (m^2), C^* adalah kelarutan CO_2 di dalam pelarut, C_0 adalah konsentrasi gas CO_2 sebelum melewati modul dan C_1 adalah konsentrasi CO_2 setelah melewati modul.

Koefisien perpindahan massa umumnya dinyatakan dalam bentuk korelasi perpindahan massa. Dalam aliran kontaktor membran, bentuk korelasi perpindahan massa ditunjukkan dengan persamaan berikut :

$$Sh = aRe^b Sc^e \quad (2.8)$$

Dengan Sh adalah bilangan Sherwood, Re adalah bilangan Reynold (Re) dan Sc adalah bilangan Schmidt. Berikut ini persamaan ketiga bilangan tak berdimensi tersebut :

$$Sh = k \frac{d_e}{D} \quad (2.9)$$

Dengan Sh adalah bilangan Sherwood, k adalah koefisien perpindahan massa (m/s), d_e adalah diameter ekuivalen (m), dan D adalah difusivitas pelarut (m^2/s)

$$Re = \frac{\rho v d_e}{\mu} \quad (2.10)$$

Dengan Sh adalah bilangan Sherwood, ρ adalah massa jenis pelarut (kg/m^3), v adalah kecepatan aliran (m/s), d_e adalah diameter ekuivalen (m), dan μ adalah viskositas dari pelarut (kg/ms)

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (2.11)$$

Dengan Sc adalah bilangan Schmidt, ν adalah viskositas kinematik (m/s) dan D adalah difusivitas pelarut (m^2/s).

Untuk aliran fluida di dalam dan di luar membran, faktor yang perlu diperhatikan adalah faktor kekosongan (*void fraction, ϵ*) yaitu perbandingan volume kosong terhadap volume total ruang perpindahan massa (volume serat ditambah volume kosong)

$$\varepsilon = 1 - n_{fiber} \left(\frac{d_{0,fiber}}{d_{i,module}} \right)^2 \quad (2.12)$$

Dengan $d_{0,fiber}$ adalah diameter serat (m), $d_{i,module}$ adalah diameter selongsong modul (m), dan n_{fiber} jumlah serat di dalam modul.

Laju alir yang mengalir pada bagian selongsong di sekitar serat dapat dianalogikan serupa dengan laju alir yang mengalir pada bagian selongsong yang diakibatkan oleh dua silindris kosentris yang memiliki $d_{0,fiber}$ dan $d_{ekivalen}$. Diameter ekuivalen ini dihitung dari persamaan :

$$d_e = \frac{d_{0,fiber}}{\sqrt{1-\varepsilon}} \quad (2.13)$$

Dengan d_e adalah diameter ekuivalen (m), $d_{0,fiber}$ adalah diameter serat (m), dan ε adalah faktor kekosongan di dalam modul.

2.4 State of The Art

Penelitian tentang absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga sudah dikembang sejak lama untuk mendapatkan efektivitas absorpsi yang terbaik. Saat ini, penelitian ini sudah dikembangkan dalam bagian jenis pelarut yang digunakan. Tabel dibawah ini menunjukkan bagan tentang perkembangan penelitian dan posisi penelitian yang akan dikembangkan dalam penelitian ini.

Tabel 2.2 . *State of The Art*

		Pelarut						
		Tunggal		Campuran				
		Amine	Non Amine	Amine			Amine with non amine	Non Amine
				DEA/MDEA	MEA/MDEA	MEA/DEA		
Variabel	Laju Alir Pelarut	Rangwala 1995; Bottino 2007; deMontigny 2005; Kumara 2002 ;Khaisri 2009	Rangwala 2005		Gong 2006	Penelitian ini	Lu 2006 ; Jian-gang 2009	
	Laju Alir Gas	Keshavarz 2007 ;Yan 2007	Yan 2007					Lu 2009
	Tekanan	Faiz 2010	Dindore 2003					
	Komposisi Pelarut	Kim 2000 Wang 2004	Lin 2008		Gong 2006		Jiang-gang 2009	Lu 2009; Jun Yue 2007

Pada awalnya, penelitian tentang absorpsi CO₂ menggunakan membran serat berongga sebagai kontaktor dimulai oleh Rangwala tahun 1995. Pada penelitian tersebut pelarut yang digunakan masih berupa air dan NaOH. Kemudian banyak peneliti yang mulai tertarik untuk meneliti kemampuan senyawa amina untuk digunakan sebagai absorben dalam proses absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga. Penelitian tersebut antara lain dilakukan oleh Bottino pada tahun 2007, deMontigny tahun 2005, Kumara tahun 2002 dan Khaisri 2009. Namun peneliti-peneliti di atas umumnya hanya memerhatikan pengaruh dari laju alir pelarut terhadap koefisien perpindahan massa. Maka Keshavarz dan Yan pada tahun 2007 mulai meneliti bagaimana pengaruh variabel lain seperti laju alir gas pada aspek perpindahan massa. Dan selanjutnya Faiz pada tahun 2010 meneliti bagaimana pengaruh tekanan pada proses absorpsi dengan menggunakan pelarut amina.

Kemudian peneliti mulai mengombinasikan pelarut-pelarut yang ada dengan harapan dapat meningkatkan efektivitas absorpsi. Pencampuran lebih dari satu absorben sebagai pelarut dapat berupa campuran senyawa amina, campuran amina dengan senyawa lain, dan campuran pelarut yang tidak mengandung amina. Berbagai penelitian sudah dilakukan misalnya dengan pelarut campuran single amino-acid salt, glycin salt (GLY), dan piperazine oleh Lu pada tahun 2009 serta amina dengan senyawa lain yaitu glycine salt (GLY) dan MEA oleh Jiang-gang pada tahun 2009. Dan penelitian yang menggunakan campuran senyawa amina, yaitu MEA dengan MDEA sebagai pelarut. Penelitian ini dilakukan oleh Gong pada tahun 2006 dengan memerhatikan pengaruh konsentrasi dan laju alir pelarut.

Posisi penelitian ini sendiri ialah meneliti kemampuan campuran senyawa MEA dan DEA untuk digunakan sebagai pelarut pada absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga. Dengan dilakukannya penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangan pada perkembangan ilmu pengetahuan di bidang absorpsi CO₂ dengan kontaktor membran sehingga kontaktor membran dapat digunakan semakin efektif dan siap untuk menggantikan kontaktor kolom konvensional pada proses separasi CO₂ untuk keperluan yang luas, khususnya untuk pemurnian gas alam.

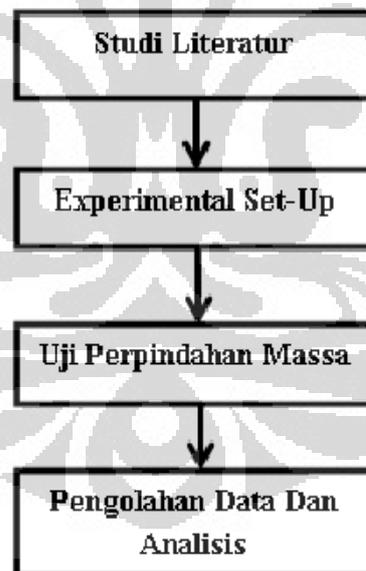
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Pendahuluan

Secara garis besar, penelitian ini akan meninjau bagaimana efektivitas daya absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga menggunakan pelarut campuran senyawa amina (MEA/DEA). Variabel yang menjadi perhatian adalah laju alir pelarut. Efektivitas daya absorpsi akan dievaluasi berdasarkan studi perpindahan massa dan studi hidrodinamika. Penelitian akan dilakukan di Laboratorium Intensifikasi Proses Lantai 2, Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia

3.2 Rancangan Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan secara bertahap dengan beberapa langkah yang terdiri dari studi literatur, experimental set-up, uji perpindahan massa dan hidrodinamika, serta pengolahan data dan analisis hasil. Di bawah ini dapat dilihat diagram alir penelitian yang akan dilakukan :



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2.1 Studi Literatur

Sebelum secara teknis menulis dan merancang penelitian ini, langkah pertama yang dilakukan adalah mempelajari literatur-literatur yang berhubungan

dengan penelitian ini. Sebagian besar literatur diambil dari jurnal-jurnal penelitian nasional maupun internasional. Literatur yang dicari dan dipelajari menjelaskan tentang hal-hal berikut :

1. Sifat dan pengaruh CO₂ dalam gas alam.
2. Teknologi pemisahan CO₂ dari absorpsi pada kolom konvensional sampai absorpsi dalam kontaktor membran serat berongga. Prinsip dari kinerja kontaktor membran serat berongga juga dipelajari lebih dalam di bagian ini.
3. Pemilihan pelarut MEA/DEA sebagai faktor yang penting serta pengaruh laju alir pelarut dalam efektivitas absorpsi CO₂ dalam kontaktor membran serat berongga.
4. Prinsip kinerja absorpsi CO₂ berdasarkan prinsip perpindahan massa. Prinsip perpindahan massa menjelaskan tentang koefisien perpindahan massa dan relasinya dengan jumlah CO₂ yang terserap. Sedangkan, prinsip hidrodinamika menjelaskan tentang pengaruh jenis aliran dan adanya friksi terhadap efektivitas absorpsi.

Selain itu, pencarian MSDS (*Material Safety Datasheet*) mengenai MEA dan DEA adalah hal yang penting untuk melakukan *risk assessment*.

3.2.2 Experimental Set-Up

a. Alat :

1. Kontaktor membran serat berongga sebagai modul dengan variasi jumlah serat sebesar 20, 30 dan 40.
2. Ember sebagai wadah bagi pelarut
3. Drum penampung limbah
4. Pompa aquarium untuk memompa pelarut
5. Tabung gas yang berisi gas CO₂ murni
6. Papan kayu
7. Needle valve untuk membuka dan menutup tabung gas
8. Needle Valve dan liquid flow meter (ml/menit) untuk mengatur laju alir pelarut

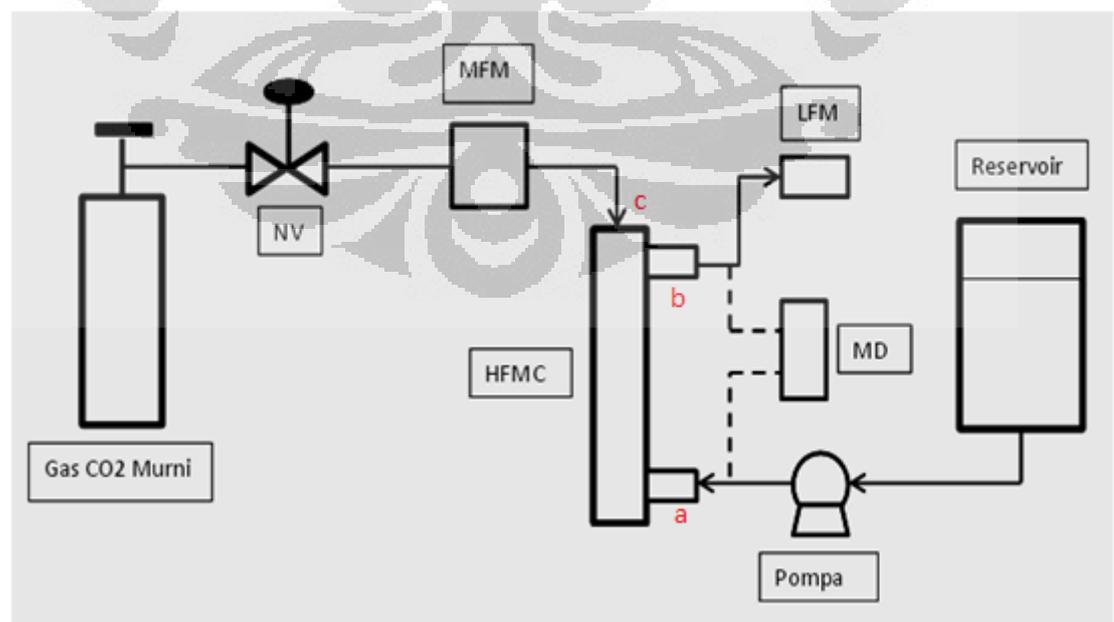
9. Regulator gas untuk mengatur laju alir gas CO₂ dan mengetahui tekanan gas saat keluar dari tabung
10. Gas flow meter untuk mengatur dan mengetahui besarnya laju alir gas
11. pH meter untuk mengukur pH absorben (sampel)
12. Selang silicon
13. Kawat pengait untuk mengaitkan modul kontaktor membran serat berongga pada papan kayu
14. Termometer untuk mengukur suhu sampel
15. Beaker glass untuk menampung sampel yang akan diukur pH dan suhu nya
16. Gelas ukur untuk membuat larutan
17. Manometer untuk mengukur perubahan tekanan sistem

b. Bahan :

1. Gas CO₂ dengan komposisi CO₂ murni
2. Larutan MEA Nalco dan DEA Mercks-Schuchardt
3. Aquades

c. Skema Alat :

Skema rangkaian kontaktor membran serat berongga dengan peralatan lain :



Gambar 3.2 Skema alat penelitian

Keterangan :

NV : Needle Valve HFMC : Hollow Fiber Membrane Contactor

LFM : Liquid Flow Meter MD : Manometer Digital

MFM : Mass Flow Meter

Dalam skema alat diatas dapat dilihat bahwa kontaktor membran serat berongga terdiri dari dua aliran masuk (a dan c) dan satu aliran keluar (b). Aliran c adalah aliran gas CO₂ yang berasal dari tabung lalu diatur alirannya oleh valve serta laju alirannya diatur dengan *mass flow meter* (MFM). Aliran a adalah aliran pelarut campuran aminas (MEA/DEA) berasal dari reservoir yang dibantu dengan pompa dan diatur laju alirnya dengan *liquid flow meter* (LFM). Pada bagian inilah variasi laju alir pelarut dilakukan. Aliran c adalah aliran keluaran dari membran yaitu pelarut amina yang didalamnya terdapat CO₂ yang terabsorp. Aliran ini diukur laju alirnya dengan *liquid flow meter* (LFM) dan data inilah yang akan diuji dengan titrasi.

3.2.3 Uji Perpindahan Massa

Prosedur Penelitian

1. Membuat modul dan *experimental set-up* seperti pada gambar 3.2 di atas. Menghubungkan modul dengan peralatan lain, seperti reservoir, pompa, flowmeter, dan tabung CO₂
2. Menyiapkan pelarut yang akan digunakan yaitu larutan DEA 10% dan larutan campuran DEA/MEA dengan konsentrasi masing-masing 5%.
3. Kondisi operasi yang digunakan (variabel tetap) adalah tekanan 1 atm dan suhu ruang (25°C).
4. Mengalirkan gas CO₂ dengan laju alir 900 cm³/menit dan tekanan tetap lalu menunggu hingga keadaan stabil.
5. Mengalirkan pelarut dengan variasi laju alir 200,250,300,350,400 ml/menit dan menunggu hingga keadaan stabil

6. Mengambil sampel untuk setiap variasi laju alir pelarut
7. Mengambil data sampel berupa (data diambil tiap variasi laju alir) :
 - pH dan suhu awal pelarut
 - pH dan suhu sampel
8. Mengulangi prosedur untuk setiap variasi laju alir pelarut yaitu
9. Mengalirkan pelarut dengan variasi laju alir 200,250,300,350,400 ml/menit

3.2.4 Pengolahan Data dan Analisa

I. Studi Perpindahan Massa

a. Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa

Dalam bagian, data yang harus didapatkan adalah :

1. Jumlah serat
2. Laju alir pelarut (divariasikan)
3. pH awal pelarut
4. pH pelarut setelah keluar kontaktor (dihitung dengan titrasi)
5. Suhu awal pelarut (T)
6. Suhu akhir pelarut setelah keluar kontaktor (T⁰)

a. Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa

Sedangkan pada pelarut campuran amina (DEA/MDEA), perhitungan $[\text{CO}_2]_0, [\text{CO}_2]_t$, dan (C^*) dilakukan dengan perbandingan koefisien pada reaksi antara amina (MEA/DEA) dengan CO_2 .

Setelah mendapatkan nilai-nilai diatas barulah dapat dihitung koefisien perpindahan massa dengan persamaan :

$$k_L = \frac{Q_L}{A_m} \ln \frac{C^* - C_0}{C^* - C_t} \quad (3.1)$$

b. Perhitungan Fluks Perpindahan Massa

Fluks perpindahan massa (J) untuk pelarut air dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$J = K_L (C^* - C_1) \quad (3.2)$$

Keterangan :

C_0 = Konsentrasi pelarut sebelum mengabsorpsi CO_2

C_1 = Konsentrasi pelarut sebelum mengabsorpsi CO_2

Penelitian ini dilakukan sebanyak 5 kali untuk tiap variasi alju alir. Pada tahap ini dilakukan analisis bagaimana pengaruh laju alir terhadap hasil koefisien perpindahan massa dan fluksnya. Koefisien perpindahan massa dan fluksnya menunjukkan seberapa besar daya absorpsi kontaktor membran dengan pelarut terhadap CO_2 .

II. Korelasi Perpindahan Massa

Korelasi perpindahan massa sebagai fungsi karakteristik aliran liquid diwakili oleh hubungan antara bilangan Sherwood (Sh) dan bilangan Reynold (Re) Bilangan Sherwood mewakili koefisien pindah massa tak berdimensi, dan bilangan Reynold mewakili karakteristik aliran

Ketiga bilangan tersebut dirumuskan sebagai berikut :

$$Sh = k \frac{d_e}{D} \quad (3.3)$$

$$Re = \frac{\rho v d_e}{\mu} \quad (3.4)$$

Dimana :

K = koefisien perpindahan massa (m/s)

d_e = diameter ekuivalen modul (m)

D = difusivitas pelarut (m^2/s)

ρ = massa jenis pelarut (kg/m^3)

v = kecepatan aliran (m/s)

d_e = diameter ekivalen kontaktor (m)

μ = viskositas pelarut (kg/ms)

Ketiga besaran tersebut lalu dihubungkan menjadi persamaan :

$$Sh = a \varphi^A Re^b \quad (3.5)$$

Dimana :

φ = fraksi kepadatan membran

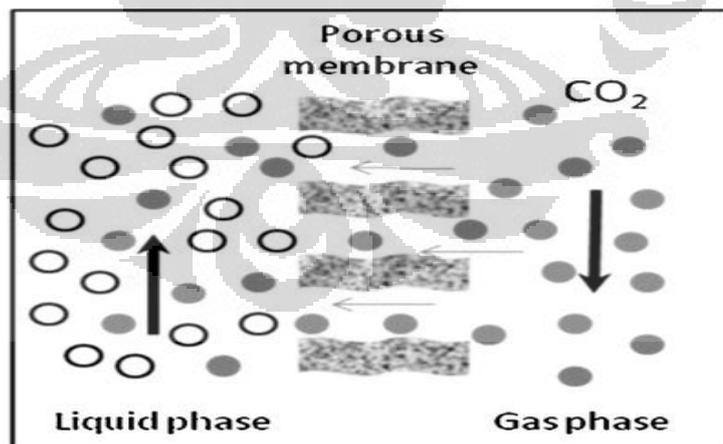
Persamaan (3.9) adalah persamaan untuk menunjukkan hubungan koefisien perpindahan massa terhadap jenis aliran pada modul, baik aliran laminar maupun turbulen. Pada perhitungan ini, dilakukan analisis tentang bagaimana pengaruh jenis aliran baik laminar, transisi, maupun turbulen terhadap koefisien perpindahan massa.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

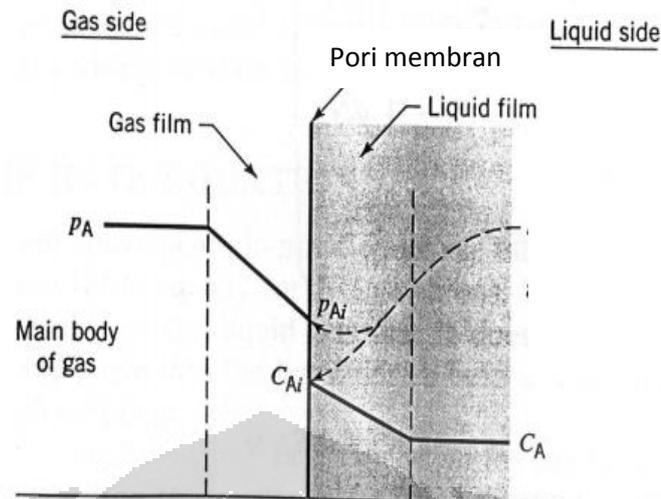
4.1 Pendahuluan

Secara umum, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas kontaktor membran serat berongga dalam menyerap gas CO₂ menggunakan pelarut campuran senyawa amina. Efektivitas penyerapan CO₂ ditinjau dari dua hal yaitu seberapa besar kapasitas penyerapan kontaktor membran dalam menyerap CO₂ dengan jumlah tertentu dan seberapa banyak pengurangan CO₂ yang terjadi setelah melewati modul kontaktor membran. Dengan demikian, analisis penelitian ini ditinjau dari studi perpindahan massa dan korelasinya serta persentase *acid loading* yang terjadi.

Penelitian ini berada dalam pengembangan mengenai jenis pelarut yang digunakan pada kontaktor membran serat berongga untuk menyerap gas CO₂. Jenis pelarut yang digunakan merupakan campuran amina yang akan dibandingkan pelarut tunggal DEA. Pelarut yang digunakan pada penelitian ini adalah pelarut campuran MEA/DEA dengan masing-masing komposisi berat sebesar 5%. Dengan memakai pelarut MEA/DEA dengan komposisi masing-masing 5 %, yang berarti digunakan 10% campuran amina, kinerja pelarut ini dapat dibandingkan pelarut tunggal yang komposisi 10 % pula.



Gambar 4.1 Skema perpindahan molekul CO₂ ke dalam fasa liquid



Gambar 4.2 Fenomena difusi fasa gas ke dalam fasa liquid

Proses absorpsi yang terjadi di kontaktor membran serat berongga pada Gambar 4.1 merupakan peristiwa berpindahannya molekul gas CO_2 ke dalam pelarut (fasa liquid) yang disebabkan karena gradien konsentrasi di antara dua fasa tersebut. Peristiwa perpindahan molekul yang terjadi digambarkan pada Gambar 4.2. Gas CO_2 akan berdifusi melalui pori-pori membran lalu berdifusi kembali melalui lapisan film pelarut (fasa liquid). Setelah gas dapat berdifusi pada lapisan film fasa liquid, reaksi pengikatan CO_2 oleh amina dapat terjadi. Namun, reaksi yang terjadi dalam absorpsi ini sangat cepat dibandingkan peristiwa difusinya (Saeid Rajabzadeha 2009). Oleh karena itu, dalam hal ini difusi merupakan variabel pengontrol terjadinya penyerapan CO_2 di dalam kontaktor membran serat berongga.

Variabel yang digunakan pada penelitian ini difokuskan pada laju alir pelarutnya. Laju alir pelarut yang dipilih dalam penentuan desain kontaktor membran serat berongga menentukan dinamika dan bentuk aliran pelarut yang terjadi pada modul. Hal ini akan memengaruhi efektivitas perpindahan massa yang terjadi baik dari faktor tahanan, kecepatan reaksi, luas kontak sampai turbulensi aliran.

4.2 Koefisien Perpindahan Massa dan Fluks Perpindahan Massa

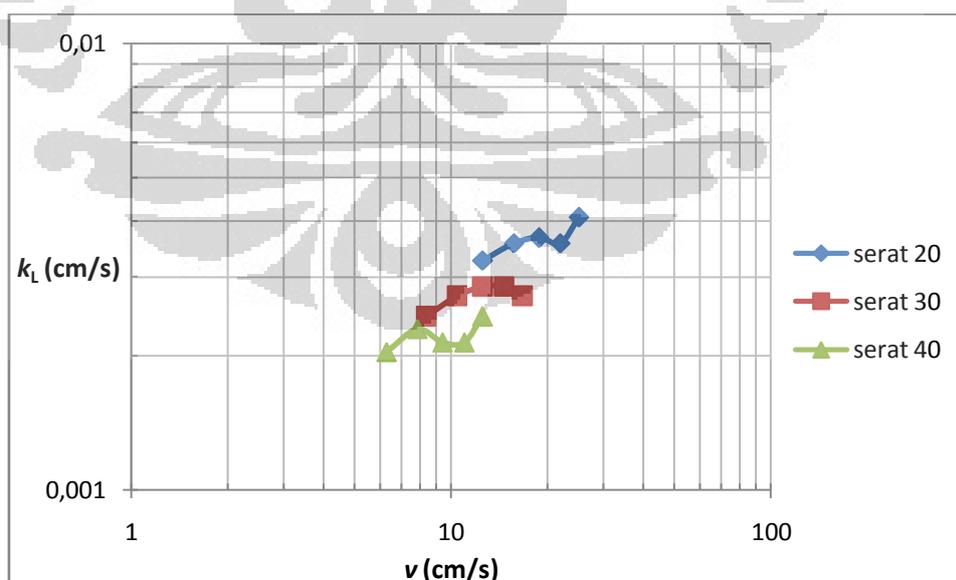
Koefisien perpindahan massa merupakan parameter yang memperlihatkan perubahan konsentrasi pelarut sebelum dan sesudah melewati modul yang telah dialiri gas CO_2 . Perbedaan konsentrasi pelarut yang terjadi

sebanding dengan jumlah CO₂ yang terserap oleh pelarut. Data yang diambil pada setiap sampel pelarut yang melewati modul pada setiap variasi laju alir pelarut adalah pH dan temperatur.

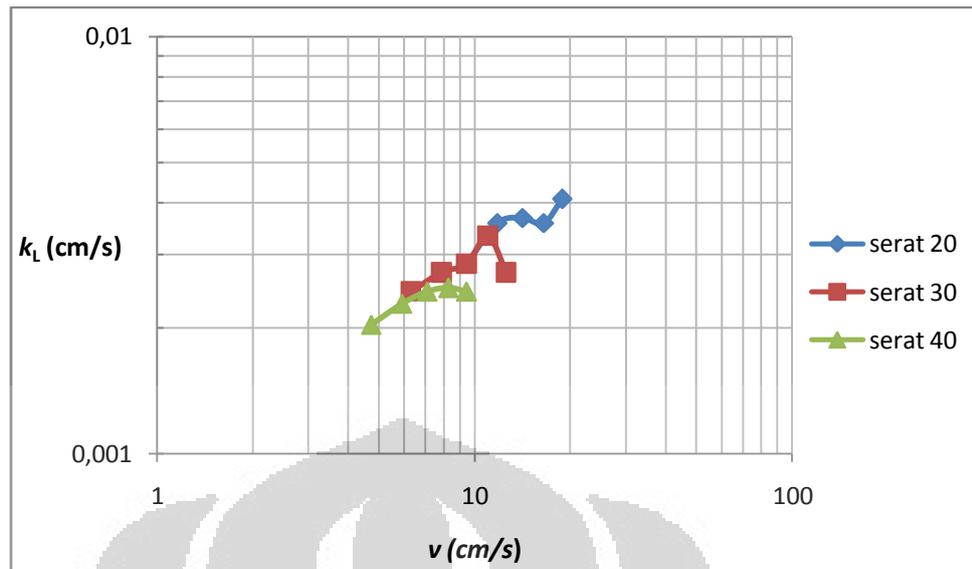
Efektivitas perpindahan massa dapat ditinjau juga oleh besarnya nilai fluks perpindahan massa. Nilai fluks merupakan besaran yang menunjukkan banyaknya mol CO₂ yang terserap pada luas daerah tertentu pada membran pada basis waktu tertentu. Berikut pembahasan nilai k_L dan fluks perpindahan massa yang dipengaruhi oleh laju alir pelarut, jumlah serat dan jenis pelarut. Dari tiga pertimbangan variabel ini diharapkan didapatkan kondisi optimum pada desain membran kontaktor.

4.2.1 Pengaruh Laju Alir Pelarut

Pada absorpsi CO₂, laju alir pelarut merupakan faktor yang berperan penting dalam menentukan nilai koefisien perpindahan massa (k_L). Hal ini berkaitan dengan bagaimana laju alir pelarut akan menentukan dinamika alirannya sehingga akan memperkecil hambatan fasa cair pelarutnya. Pengaruh laju alir pelarut dapat dilihat melalui kecepatan linier. Grafik hubungan kecepatan linier terhadap koefisien perpindahan massa (k_L) dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan 4.2 untuk masing-masing pelarut sebagai berikut.



Gambar 4.3 Pengaruh kecepatan linier pelarut DEA terhadap koefisien perpindahan massa



Gambar 4.4 Pengaruh kecepatan linier pelarut MEA/DEA terhadap koefisien perpindahan massa

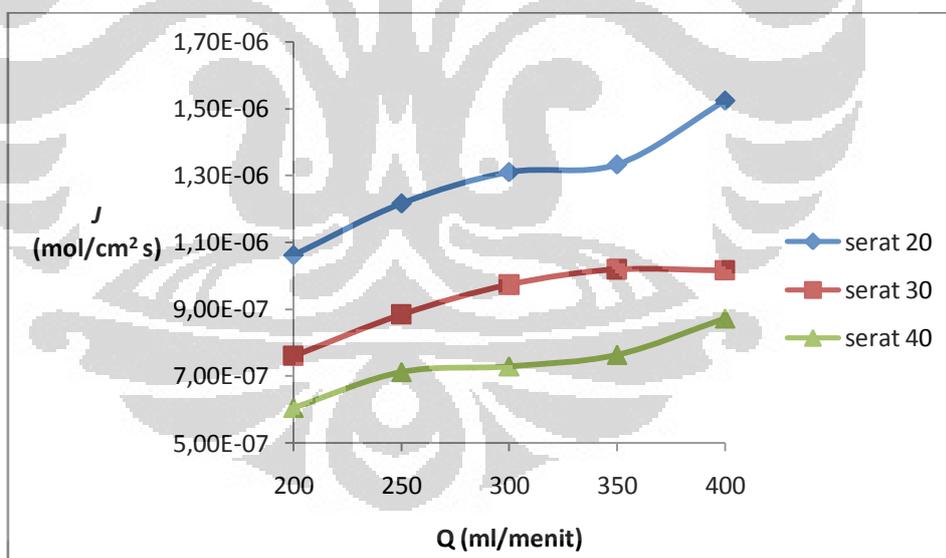
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa makin besar laju linear maka koefisien perpindahan massa akan cenderung makin besar. Perpindahan massa dari gas CO_2 ke pelarut amina disebabkan oleh perbedaan konsentrasi dan reaksi kimia sebagai gaya pendorongnya dan dipengaruhi oleh tahanan yang terjadi pada fasa liquidnya. Peningkatan kecepatan linier pelarut akan membuat alirannya semakin turbulen sehingga arus Eddy yang terjadi juga akan semakin besar. Arus eddy akan membuat hambatan aliran akan lebih kecil dan memperbesar koefisien perpindahan massa. Sebaliknya laju alir yang kecil akan membuat distribusi aliran berada dominan pada lapisan film membran karena terbentuknya lapisan batas (*boundary layer*) pada larutan sehingga difusi gas ke pelarut tidak terjadi pada keseluruhan daerah aliran pelarut tetapi hanya pada lapisan filmnya sampai mengalami kejenuhan. Akibatnya daerah aliran pelarut pada pusat dari membran tidak menyerap CO_2 dan konsentrasinya akan sama dengan konsentrasi sebelum memasuki membran. Oleh karena itu keberadaan aliran yang kurang turbulen pada lapisan film membran akan cenderung menaikkan tahanan fasa liquidnya dan berakibat menurunnya koefisien perpindahan massa.

Selain itu, peningkatan koefisien perpindahan massa dipengaruhi oleh fraksi kekosongan dan distribusi pelarut dalam modul. Semakin besar laju kecepatan aliran, maka fraksi kekosongan semakin terpenuhi oleh pelarut sehingga distribusi pelarut menjadi lebih merata dan membuat luas kontak

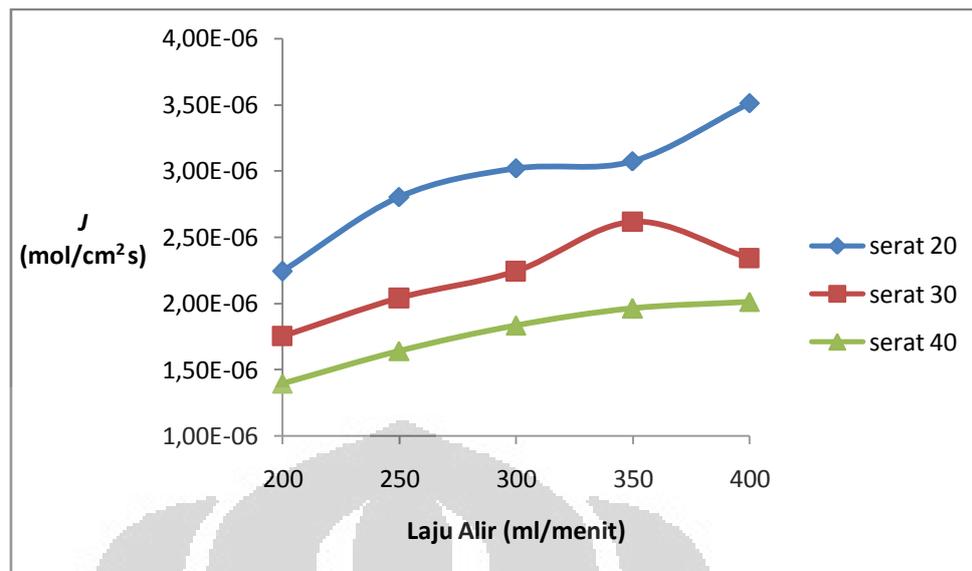
absorpsi lebih besar. Dengan demikian, perpindahan massa akan menjadi lebih efisien.

Pada grafik diatas khususnya pada serat 20 dan 30, nilai k_L pada mengalami penurunan pada variasi kecepatan linier yang paling tinggi. Hal ini disebabkan oleh faktor pembasahan membran yang mulai terjadi. Hal ini sejalan oleh penelitian (Jing-Liang Li 2003) yang mengindikasikan bahwa usaha menaikkan kecepatan linier dari pelarut memiliki batas tertentu. Pada kecepatan linier yang tinggi, pelarut berpotensi untuk membasahi pori membran sehingga menaikkan tahanan pada fasa membran. Kenaikan tahanan inilah yang membuat nilai k_L akan menurun.

Dengan meningkatnya laju alir, fluks perpindahan massa yang terjadi juga akan semakin meningkat seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3 dan 4.4. Fluks menggambarkan banyaknya mol CO_2 untuk setiap luas daerah membran pada waktu tertentu. Makin banyak laju alir pelarut yang dipilih, maka gradien konsentrasi CO_2 pun makin tinggi sehingga sebagai *driving force* perpindahan massa jumlah CO_2 yang berpindah akan makin banyak.



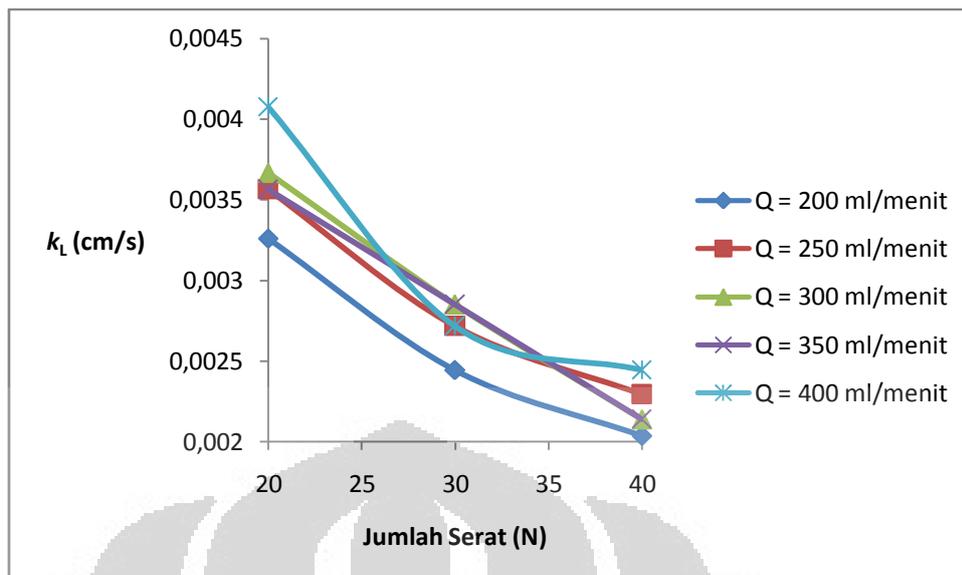
Gambar 4.5 Pengaruh laju alir pelarut DEA terhadap fluks perpindahan massa



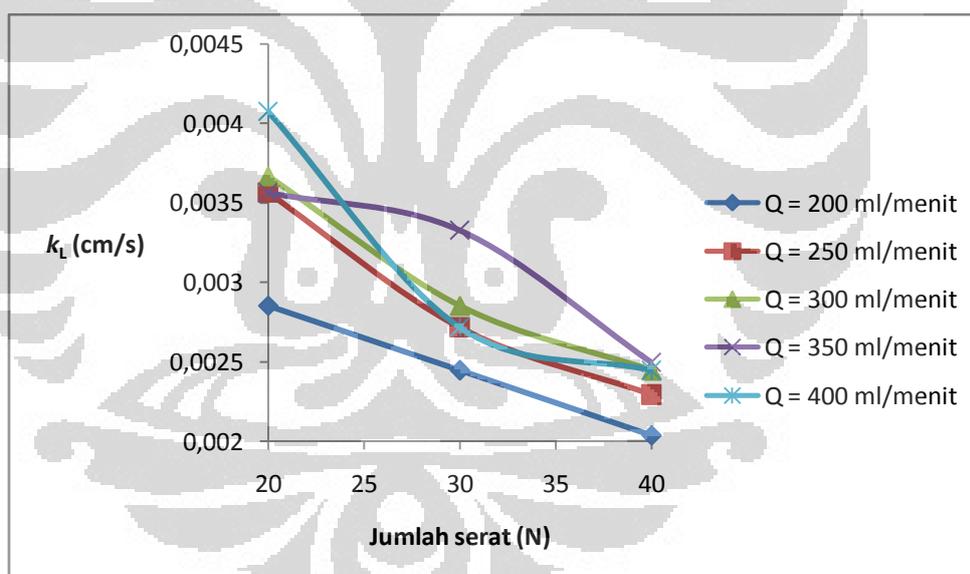
Gambar 4.6 Pengaruh laju alir pelarut MEA/DEA terhadap fluks perpindahan massa

4.2.2 Pengaruh Jumlah serat

Pada penelitian ini, penggunaan modul berbeda dilakukan berdasarkan jumlah seratnya. Dengan demikian, pengaruh jumlah serat dari modul terhadap koefisien perpindahan massa dapat ditinjau. Absorpsi adalah peristiwa perpindahan massa yang dipengaruhi oleh dua zat yang dikontakkan pada luas daerah tertentu. Dengan luas daerah yang lebih besar, absorpsi akan lebih baik yang ditunjukkan dengan meningkatnya koefisien perpindahan massa. Gambar 4.5 dan 4.6 menggambarkan pengaruh jumlah serat pada koefisien perpindahan massa untuk masing-masing jenis pelarut.



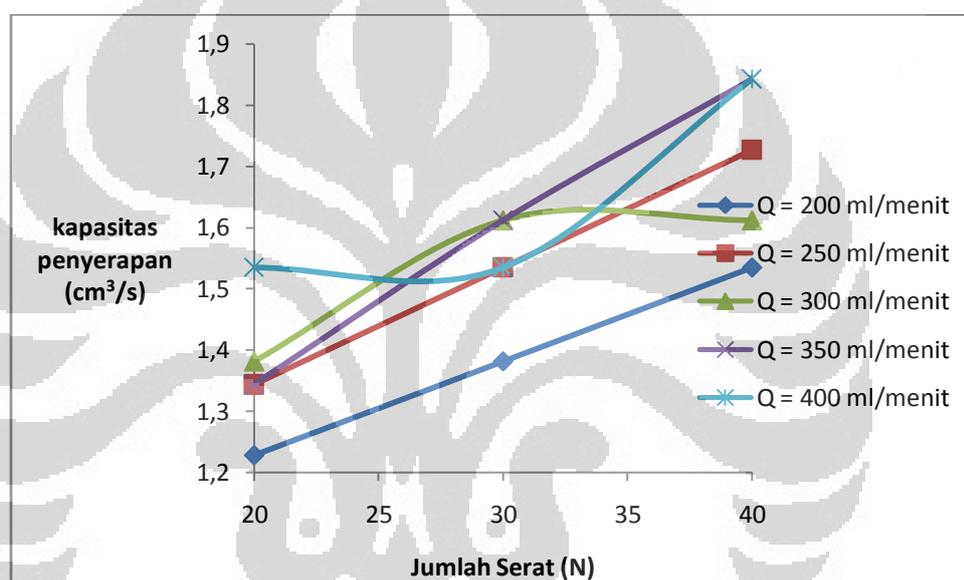
Gambar 4.7 Pengaruh jumlah serat (N) dalam modul terhadap koefisien perpindahan massa untuk pelarut DEA



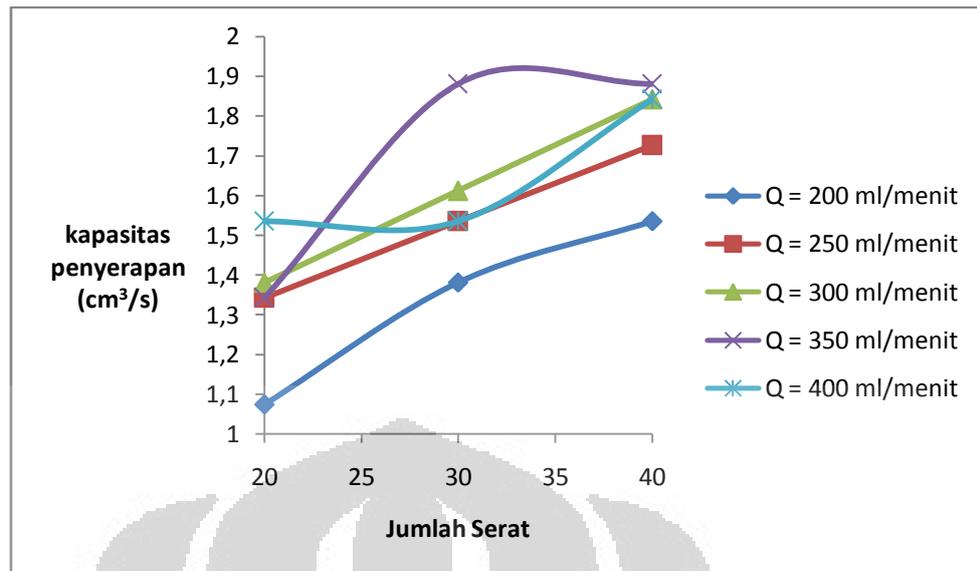
Gambar 4.8 Pengaruh jumlah serat (N) dalam modul terhadap koefisien perpindahan massa untuk pelarut MEA/DEA

Peningkatan jumlah serat dalam modul diharapkan akan memberikan luas kontak permukaan yang lebih besar sehingga koefisien perpindahan massa lebih besar. Namun, gambar diatas menunjukkan bahwa peningkatan jumlah serat akan membuat koefisien perpindahan massa semakin kecil. Koefisien perpindahan massa (k_L) merupakan koefisien yang menunjukkan efisiensi perubahan konsentrasi pelarut karena absorpsi CO_2 pada yang tersebar pada luas daerah tertentu. Oleh

karena itu, makin banyak jumlah serat pada modul, maka daerah persebaran k_L pada membran menjadi lebih banyak. Dengan demikian, k_L pada jumlah serat 40 akan lebih kecil dari yang lainnya. Namun hal ini tidak menunjukkan bahwa jumlah serat yang lebih baik ada jumlah serat 20. Dengan mengalikan koefisien perpindahan massa dengan luas penampang membran pada jumlah serat masing-masing, maka akan terlihat koefisien perpindahan massa *overall* yang menunjukkan kapasitas penyerapan pada masing-masing jumlah serat. Gambar 4.7 dan 4.8 menggambarkan pengaruh jumlah serat terhadap kapasitas penyerapan membran untuk masing-masing jenis pelarut.



Gambar 4.9 Pengaruh jumlah serat (N) dalam modul terhadap kapasitas penyerapan untuk pelarut DEA



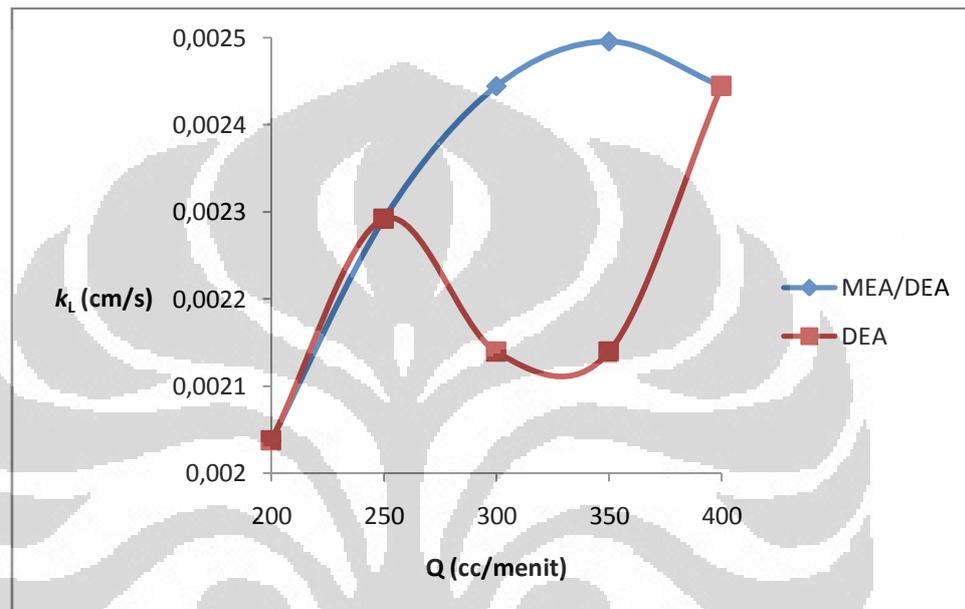
Gambar 4.10 Pengaruh jumlah serat (N) dalam modul terhadap kapasitas penyerapan untuk pelarut MEA/DEA

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya jumlah serat, kapasitas penyerapan gas akan meningkat. Hal ini disebabkan karena bertambahnya luas kontak permukaan absorpsi sehingga perpindahan massa akan meningkat. Namun, jika dilihat dari rentang perubahannya, kenaikan kapasitas penyerapan dari serat 20 ke 30 tidak terlalu signifikan jika dibandingkan serat 20 ke 40. Hal ini kemungkinan disebabkan karena pengaturan jarak antar membran pada serat 30 terlalu rapat atau bahkan saling berhimpit jika dibandingkan serat 20 dan 40. Jarak membran yang terlalu rapat atau berhimpit membuat luas kontak permukaan yang seharusnya menjadi lebih besar malah menjadi tidak signifikan sehingga efektifitas penyerapannya pun tidak berubah banyak bahkan mengalami penurunan seperti pada laju alir 250 ml/menit dan 350 ml/menit.

4.2.3 Pengaruh jenis pelarut

Proses absorpsi CO_2 pada kontaktor membran serat berongga dipengaruhi oleh jenis pelarut yang digunakan. Pada penelitian ini, larutan campuran MEA/DEA digunakan sebagai pelarut dan akan dibandingkan kinerjanya dengan pelarut tunggal DEA. Kedua pelarut ini merupakan pelarut yang akan dominan mengabsorpsi gas CO_2 secara kimia. Perpindahan massa pada absorpsi kimia selain karena gradien konsentrasi juga terjadi karena adanya reaksi antara kedua zat tersebut. Penggunaan pelarut tunggal DEA dan campuran MEA/DEA

bertujuan untuk mengevaluasi perpindahan massa pada proses absorpsi kimia gas CO_2 . Sifat senyawa CO_2 yang asam lemah dan pelarut amina yang basa lemah. Adanya reaksi asam basa pada proses absorpsi ini diharapkan dapat menaikkan laju absorpsi dan menaikkan koefisien perpindahan massa. Banyaknya gas CO_2 yang terserap sebanding dengan banyaknya pelarut DEA dan MEA/DEA yang berkurang karena bereaksi dengan CO_2 .



Gambar 4.11 Nilai koefisien perpindahan massa CO_2 dengan laju alir pelarut untuk setiap jenis pelarut pada jumlah serat 40

Sifat fisika dari pelarut berpengaruh pada efisiensi perpindahan massanya. Pelarut tunggal DEA memiliki nilai viskositas sebesar 1,05 cp. Nilai ini lebih besar dari viskositas pelarut campuran MEA/DEA yang memiliki nilai viskositas sebesar 0,97 cp. Nilai viskositas yang tinggi akan membuat nilai bilangan reynoldnya makin kecil atau semakin laminar. Aliran pelarut yang laminar akan membuat pelarut cenderung berada pada lapisan film membran sehingga reaksi pengikatan CO_2 pun ada banyak terjadi di daerah tersebut. Banyaknya reaksi kimia terjadi pada daerah lapisan film membran akan membuat tahanan fasa liquid terhadap reaksi pengikatan CO_2 lainnya akan meningkat sehingga efektivitas perpindahan massa akan berkurang. Untuk menanggulangi viskositas yang lebih besar pada pelarut tunggal DEA, laju alir linearnya harus diatur lebih tinggi sehingga nilai bilangan reynoldnya akan kembali lebih tinggi dan menjadi lebih

turbulen. Oleh karena itu, pertimbangan akan sifat fisik pelarut (viskositas) dan kecepatan linearnya dapat menjadi salah satu pertimbangan untuk menaikkan koefisien perpindahan massanya.

Pengaruh jenis pelarut juga dapat ditinjau dari kecepatan reaksinya. Dari Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa koefisien perpindahan massa pelarut campuran MEA/DEA lebih besar dari pelarut tunggal DEA. Fluks absorpsi CO₂ pada larutan penyerap amina menurun dari MEA>AMP>DEA>MDEA (Subham Paul 2007). Dengan demikian, penambahan MEA pada pelarut campuran akan menaikkan fluks perpindahan massanya karena kecepatan reaksinya yang besar dibandingkan pelarut yang lain. Seperti halnya dengan pelarut yang digunakan pada penelitian ini, dengan jumlah fraksi berat yang sama yaitu 10% DEA dan 5% MEA/5% DEA, efektivitas perpindahan massa pada pelarut campuran akan lebih baik dibanding pelarut tunggal.

4.3 Acid Loading

Peristiwa perpindahan massa pada absorpsi di kontaktor membran serat berongga menggunakan pelarut amina didominasi oleh reaksi kimia. Reaksi kimia yang terjadi antara gas CO₂ dan MEA/DEA adalah :

Reaksi dengan MEA :

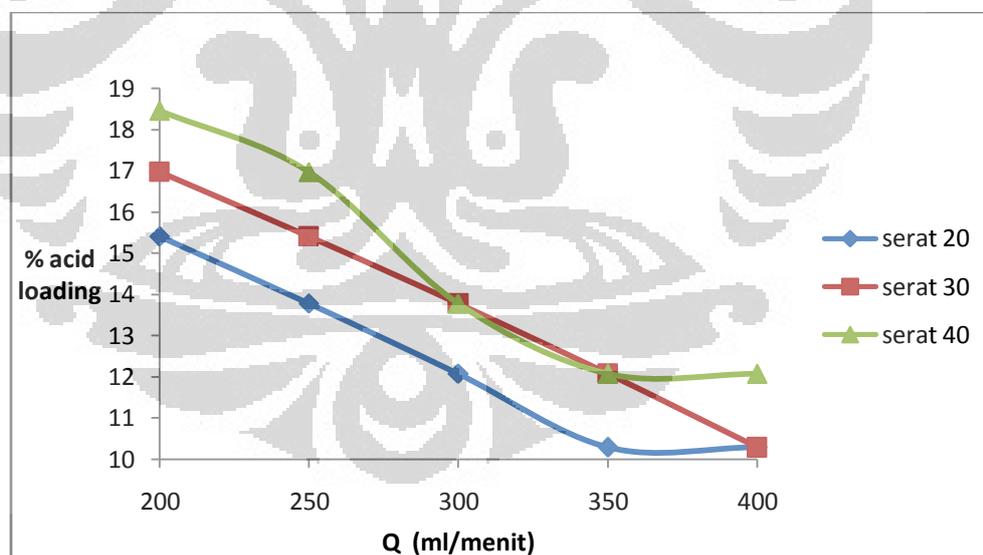


Reaksi dengan DEA :

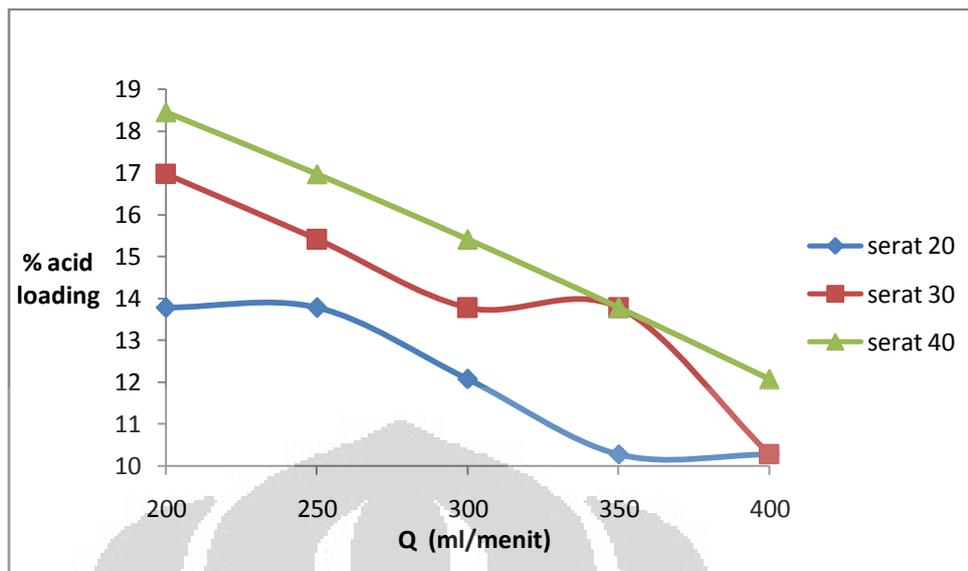


Acid loading adalah sebuah gambaran yang menunjukkan persentase jumlah konsentrasi CO₂ yang terserap (bereaksi) oleh sejumlah konsentrasi MEA/DEA tertentu. Konsentrasi pelarut diketahui dengan mengukur pH pelarut sebelum melalui modul lalu dihitung konsentrasinya. Sedangkan konsentrasi CO₂ diukur dengan menghitung selisih penurunan konsentrasi pelarut awal dengan pelarut akhir (setelah melewati modul) yang berarti jumlah CO₂ yang terserap adalah jumlah konsentrasi amina yang hilang pada pelarut setelah melewati modul.

Secara teoritis (koefisien reaksi), dengan perbandingan MEA/DEA dan CO_2 sebesar 2 : 1, nilai *acid loading* yang dapat diperoleh sebesar 50 % atau dapat diartikan 1 mol amina dapat menyerap Namun dari Dari gambar 4.10 dan 4.11 dibawah ini, terlihat bahwa nilai persentase 0,5 mol CO_2 . *acid loading* menurun ketika laju alir linear pelarutnya dinaikkan. Hal ini disebabkan karena peristiwa absorpsi kimia yang dominan terjadi pada penyerapan gas CO_2 oleh pelarut. Dengan meningkatnya laju linear pelarut, waktu tinggal reaksi akan semakin kecil sehingga menyebabkan konversi penyerapan CO_2 yang menurun. Ketika laju alir diperkecil, maka waktu tinggal absorben di modul akan naik. Akibatnya, CO_2 akan dapat berdifusi pada pori-pori membran lebih leluasa sehingga CO_2 yang terabsorp ke larutan akan semakin banyak. Sebenarnya pada laju alir yang tinggi, walaupun tidak membuat CO_2 bereaksi dengan absorben, laju alir tinggi akan membuat perbedaan konsentrasi yang tinggi pula, sehingga CO_2 yang terabsorp akan banyak. Namun karena absorpsi yang terjadi didominasi secara kimia maka faktor waktu tinggal sangat menentukan dalam mencapai efektivitas absorpsi yang lebih baik.



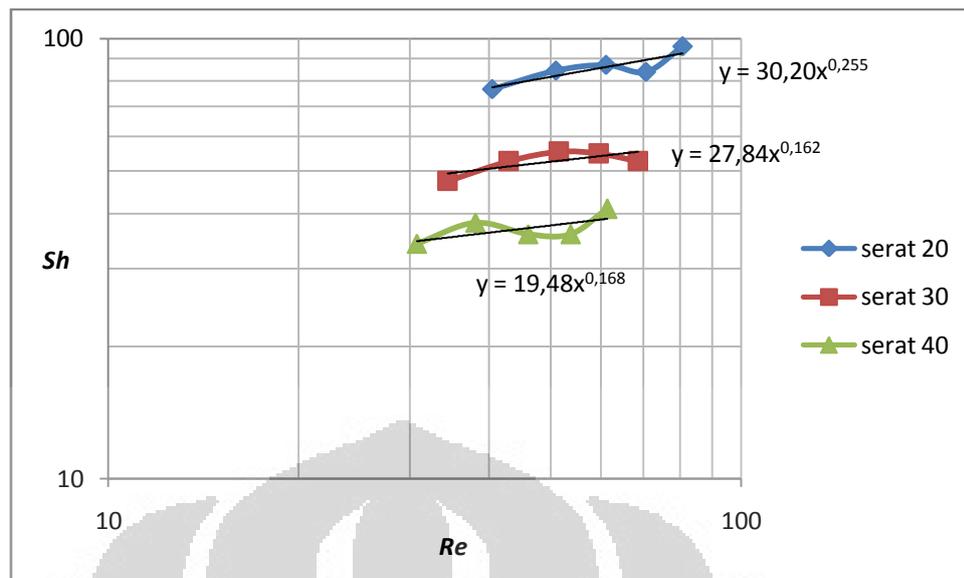
Gambar 4.12 Pengaruh laju alir pelarut terhadap % *acid loading* untuk pelarut DEA



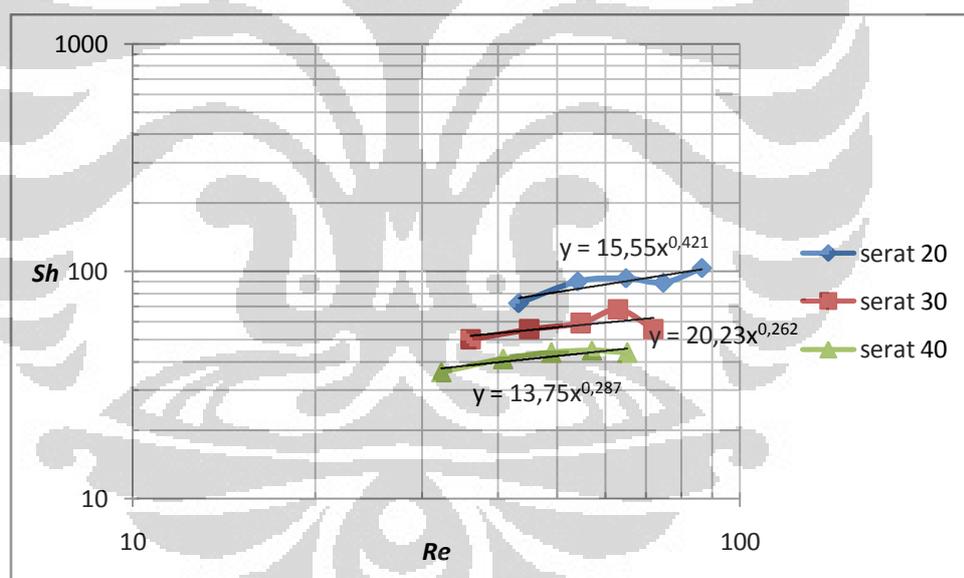
Gambar 4.13 Pengaruh laju alir pelarut terhadap % *acid loading* untuk pelarut MEA/DEA

4.4 Korelasi Perpindahan Massa

Koefisien perpindahan massa dapat dihubungkan dengan pengaruh jenis aliran melalui korelasi antara fungsi bilangan Sherwood (Sh) terhadap bilangan Reynold. Bilangan Sherwood merupakan bilangan tak berdimensi yang merupakan fungsi dari koefisien perpindahan massa (k_L), diameter ekuivalen (d_e), dan difusivitas gas CO_2 ke dalam pelarut. Ketiga komponen tadi memperlihatkan bagaimana kecepatan dan jenis senyawa pelarut yang digunakan menentukan besarnya tahanan pada absorpsi yang terjadi seperti *void fraction* dan viskositas yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Sementara itu bilangan Reynold menunjukkan jenis aliran yang terjadi di dalam modul. Bilangan ini dihitung dengan menggunakan persamaan 2.10 untuk setiap variasi laju alir dan jumlah serat. Kemudian logaritmik masing-masing bilangan tersebut dihubungkan menggunakan grafik untuk setiap laju alir dan jumlah serat pada masing-masing pelarut seperti gambar 4.12 dan 4.13.



Gambar 4.14 Perbandingan bilangan reynolds terhadap sherwood pada variasi jumlah serat untuk pelarut DEA



Gambar 4.15 Perbandingan bilangan reynolds terhadap sherwood pada variasi jumlah serat untuk pelarut MEA/DEA

Berdasarkan grafik di atas dapat terlihat bahwa kenaikan bilangan Reynold menyebabkan bilangan Sherwood juga mengalami kenaikan. Sesuai dengan persamaan menghitung bilangan reynold, kenaikan bilangan reynold akan lebih tinggi apabila nilai kecepatan liniernya dinaikkan dan viskositas diturunkan. Dengan demikian nilai bilangan Sh pada modul semakin baik dengan menaikkan kecepatan liniernya dan menurunkan viskositas pelarutnya. Nilai Sh yang lebih

tinggi menunjukkan efektivitas perpindahan massa juga lebih baik. Hal ini disebabkan dengan makin tingginya bilangan reynold akan menyebabkan aliran lebih turbulen sehingga hambatan film pada fasa cair lebih kecil.

Sesuai dengan teori korelasi perpindahan massa. Hubungan antara bilangan reynold dan bilangan sherwood :

$$Sh = aRe^b \quad (4.1)$$

Nilai b sebagai pangkat dari bilangan reynold di atas menunjukkan kondisi aliran yang terjadi pada pelarut. Apabila nilai b kurang dari 0,5 menunjukkan jenis aliran yang laminar sebaliknya nilai b lebih besar dari 0,5 menunjukkan daerah aliran yang turbulen. Dari Gambar 4.12 dan 4.13 dapat dilihat nilai b berada dikisaran 0,168-0,255 untuk pelarut DEA dan 0,287-0,421 untuk pelarut MEA. Nilai kisaran ini menunjukkan kedua aliran pelarut berada pada kondisi daerah laminar walaupun laju alirnya dinaikkan. Hal ini disebabkan karena pelarut pada penelitian ini dialirkan pada bagian *tube* (dalam membran) dan gas CO₂ pada bagian *shell* (selongsong). Aliran pelarut di dalam *tube* akan membuat aliran lebih transversal dan kurang mengalami pencampuran karena diameter *tube* yang sangat kecil. Diameter *tube* dan jarak antar membran yang kecil akan membuat bilangan reynold juga semakin kecil sehingga aliran akan lebih laminar (H.Kraulen 1992).

Untuk mendapat korelasi perpindahan massa sebagai fungsi dari fraksi kepadatan membran, nilai b pada masing-masing pelarut dirata-rata. Tabel 4.1 dan 4.2 menunjukkan nilai b untuk masing-masing pelarut serta nilai rata-ratanya.

Tabel 4.1 Perbandingan nilai b pada masing-masing jumlah serat untuk pelarut DEA

Jumlah Serat (N)	b	Korelasi
20	0.255	$Sh = 1488 Re^{0.255}$
30	0.162	$Sh = 1906 Re^{0.162}$
40	0.168	$Sh = 1386 Re^{0.195}$
Nilai rata-rata b	0.195	

Tabel 4.2 Perbandingan nilai kemiringan pada masing-masing jumlah serat untuk pelarut MEA/DEA

Jumlah Serat (N)	b	Korelasi
20	0.421	$Sh = 544 Re^{0.421}$
30	0.262	$Sh = 1180 Re^{0.262}$
40	0.287	$Sh = 835,7 Re^{0.287}$
Nilai rata-rata	0.323	

Korelasi yang menunjukkan fraksi kepadatan membran (φ) ditunjukkan oleh persamaan dibawah ini

$$Sh = a \varphi^A Re^b \quad (4.2)$$

Dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa nilai $a \varphi^A$ merupakan konstanta pada korelasi perpindahan massa yang ditunjukkan pada tabel 4.1 dan 4.2. Dengan demikian langkah berikutnya ada mencari hubungan melalui trendline power yang menghubungkan antara konstanta pada tabel 4.1 dan 4.2 dengan faktor fraksi kepadatan membran (φ). Nilai fraksi kepadatan membran (φ) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan :

$$\varphi = N \left(\frac{df}{ds} \right)^2 \quad (4.3)$$

Dengan,

N = jumlah serat

df = diameter membran

ds = diameter selongsong

Maka di dapatkan korelasi perpindahan massa :

→ untuk pelarut DEA yaitu $Sh = 54,5\varphi^{-1,53} Re^{0,195}$

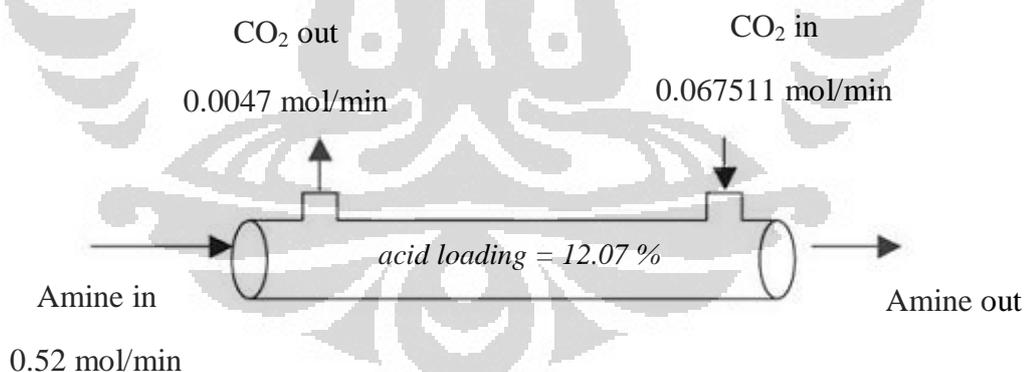
→ untuk pelarut MEA/DEA yaitu $Sh = 56,17\varphi^{-1,21} Re^{0,323}$

Dari hasil korelasi di atas dapat dilihat bahwa nilai pangkat b pada pelarut campuran MEA/DEA lebih besar daripada pelarut tunggal DEA. Hal ini disebabkan karena pelarut campuran MEA/DEA memiliki viskositas yang lebih

kecil daripada pelarut tunggal DEA sehingga bilangan reynoldnya akan makin besar. Makin besar bilangan reynold akan mengakibatkan kondisi aliran fluida lebih turbulen dengan ditunjukkan nilai pangkat b yang lebih besar. Dengan menaikkan fraksi kepadatan membran akan menurunkan nilai bilangan sherwoodnya dan akibatnya akan menurunkan nilai k_L pada membran. Fraksi kepadatan membran menunjukkan kerapatan antara sejumlah membran di dalam modul. Makin tinggi fraksi kepadatan membran, makin rapat jarak antara membran dalam modul sehingga mengakibatkan berkurangnya daerah kontak yang terjadi antara pelarut dalam membran dengan gas CO_2 pada selongsong.

4.5 Analisis Hasil Percobaan

Hasil percobaan yang didasari pada koefisien perpindahan massa, fluks, korelasi perpindahan massa dan *acid loading* pada kinerja kontaktor membran serat berongga dalam menyerap CO_2 telah dibahas dalam bagian sebelumnya. Pada intinya, kehadiran teknologi ini diharapkan dapat menyerap CO_2 sebanyak mungkin pada variabel dan kondisi operasi yang diatur. Dengan menggunakan data *acid loading* hasil perhitungan, banyaknya CO_2 yang dapat diserap oleh kontaktor dapat dilihat secara neraca massanya.



Gambar 4.16 Diagram neraca massa CO_2 untuk pelarut campuran MEA/DEA pada laju alir 400 ml/menit dan jumlah serat 40

Dari diagram diatas dapat dilihat bahwa dengan menggunakan pelarut campuran MEA/DEA dengan laju alir 400 ml/menit dan jumlah serat 40 dapat menghasilkan *acid loading* sebesar 12.07 %. Dengan mengetahui bahwa laju alir amina yang masuk sebesar 0.52 mol/menit, jumlah mol CO_2 yang terabsorpsi dapat dihitung :

$$CO_2 \text{ absorbed} : \% \text{ acid loading} \times \text{mol amina}$$

$$CO_2 \text{ absorbed} : 12.07\% \times 0.52 \frac{\text{mol}}{\text{min}} = 0.0628 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

$$CO_2 \text{ out} = CO_2 \text{ in} - CO_2 \text{ absorbed}$$

$$CO_2 \text{ out} = 0.067511 - 0.0628 = 0.0047 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

Tabel dibawah ini menunjukkan neraca massa pada masing-masing jenis pelarut pada variasi laju alir dan jumlah serat.

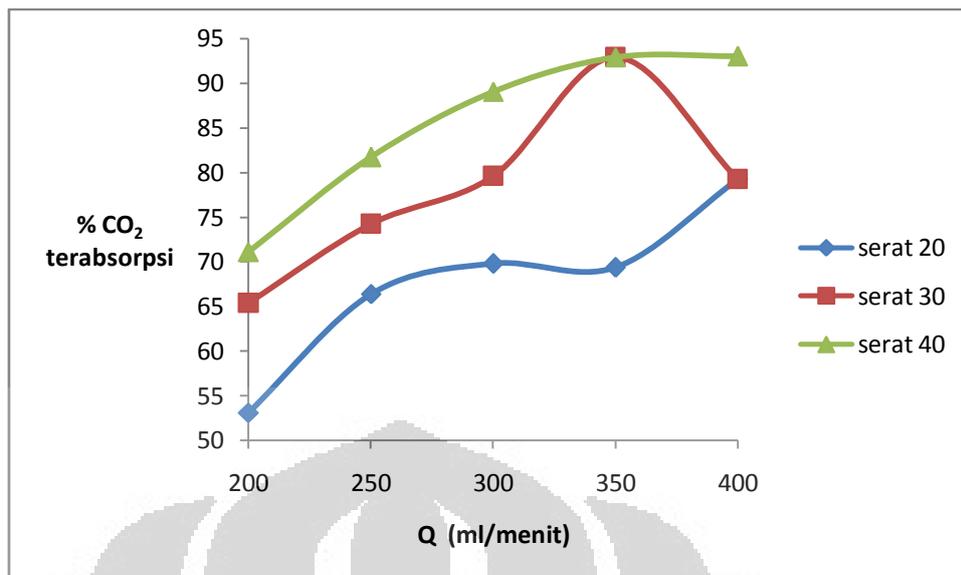
Tabel 4.3 Perhitungan neraca massa pelarut DEA

Jumlah serat	Laju Alir (ml/menit)	acid loading	DEA in (mol/menit)	CO2 in (mol/menit)	CO2 out (mol/menit)	CO ₂ Absorped (mol/menit)
20	200	0.154084515	200.1540845	0.067511	0.037939	0.029572
20	250	0.13778202	250.137782	0.067511	0.034457	0.033054
20	300	0.120711212	300.1207112	0.067511	0.032761	0.03475
20	350	0.102835883	350.1028359	0.067511	0.032973	0.034538
20	400	0.102835883	400.1028359	0.067511	0.028038	0.039472
30	200	0.169653276	200.1696533	0.067511	0.034951	0.03256
30	250	0.154084515	250.1540845	0.067511	0.030546	0.036965
30	300	0.13778202	300.137782	0.067511	0.027846	0.039665
30	350	0.120711212	350.1207112	0.067511	0.026969	0.040542
30	400	0.102835883	400.1028359	0.067511	0.028038	0.039472
40	200	0.184521328	200.1845213	0.067511	0.032098	0.035413
40	250	0.169653276	250.1696533	0.067511	0.026811	0.0407
40	300	0.13778202	300.137782	0.067511	0.027846	0.039665
40	350	0.120711212	350.1207112	0.067511	0.026969	0.040542
40	400	0.120711212	400.1207112	0.067511	0.021177	0.046334

Tabel 4.4 Perhitungan neraca massa pelarut MEA/DEA

Jumlah serat	Laju Alir (ml/menit)	<i>Acid loading</i>	MEA/DEA in (mol/menit)	CO ₂ in (mol/menit)	CO ₂ out (mol/menit)	CO ₂ <i>Absorped</i> (mol/menit)
20	200	0.13778202	0.260135319	0.067511	0.031669	0.035842
20	250	0.13778202	0.325169149	0.067511	0.022708	0.044802
20	300	0.120711212	0.390202979	0.067511	0.020409	0.047102
20	350	0.102835883	0.455236809	0.067511	0.020696	0.046815
20	400	0.102835883	0.520270639	0.067511	0.014008	0.053502
30	200	0.169653276	0.260135319	0.067511	0.023378	0.044133
30	250	0.154084515	0.325169149	0.067511	0.017407	0.050104
30	300	0.13778202	0.390202979	0.067511	0.013748	0.053763
30	350	0.13778202	0.455236809	0.067511	0.004787	0.062723
30	400	0.102835883	0.520270639	0.067511	0.014008	0.053502
40	200	0.184521328	0.260135319	0.067511	0.01951	0.048001
40	250	0.169653276	0.325169149	0.067511	0.012345	0.055166
40	300	0.154084515	0.390202979	0.067511	0.007387	0.060124
40	350	0.13778202	0.455236809	0.067511	0.004787	0.062723
40	400	0.120711212	0.520270639	0.067511	0.004708	0.062802

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa dari semua variabel laju alir dan jumlah serat yang dilakukan dalam eksperimen, jumlah CO₂ yang terabsorpsi paling banyak didapatkan pada laju alir 400 ml/menit, jumlah serat 40 dan pelarut campuran MEA/DEA. Terkhusus pada variabel yang dilakukan pada penelitian ini yaitu variasi laju alir pelarut pada rentang 200-400 ml/menit, Gambar 4.15 menggambarkan pengaruh laju alir pelarut terhadap persentase CO₂ yang terabsorpsi pada pelarut MEA/DEA.



Gambar 4.17 Pengaruh laju alir pelarut campuran MEA/DEA terhadap persentase CO₂ yang terabsorpsi

Dari grafik diatas dapat disimpulkan bahwa dengan menaikkan laju alir pelarut akan mengakibatkan persentase absorpsi makin besar. Laju alir pelarut merupakan variabel utama yang dilakukan dalam penelitian ini. Laju alir yang tinggi mengakibatkan ketebalan boundary layer pada pelarut di dalam fiber akan menurun sehingga resistansi pada fasa liquid berkurang dan difusivitas CO₂ ke daam pelarut menjadi lebih mudah. Hal inilah yang membuat variabel laju alir pelarut menjadi hal penting dalam operasi kontaktor membran.

Sebaliknya, pelarut dialirkan dalam bagian *tube* dan gas CO₂ mengalir pada bagian *shell*. Rentang variasi pelarut 200-400 ml/menit yang dilakukan ternyata memiliki bilangan reynold yang kecil (20-100) sehingga aliran pelarut cenderung laminar. Aliran pelarut yang laminar mengakibatkan hambatan fasa liquidnya menjadi besar sehingga koefisien perpindahan massa menjadi lebih kecil sehingga dapat disimpulkan kenaikan laju alir pelarut dalam bagaian *tube* tidak terlalu signifikan untuk menaikkan koefisien perpindahan massa dan fluks perpindahan massa. Oleh karena itu, untuk menaikkan koefisien perpindahan massa, aliran pelarut sebaiknya dialirkan pada bagian selongsong (*shell*) sehingga aliran dapat lebih turbulen dan kenaikan koefisien perpindahan massanya dan fluksnya dapat lebih signifikan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Nilai k_L tertinggi sebesar 0.00244 cm/s didapatkan dengan menaikkan laju alir pelarut sampai 40 ml/menit pada jumlah serat 40 namun perlu dipertimbangkan batas kenaikan laju alirnya karena adanya kecenderungan pembatasan membran.
2. Nilai *acid loading* pada pelarut campuran MEA/DEA dapat mencapai 18 %. Nilai lebih kecil dibandingkan yang dapat dicapai oleh kontaktor kolom sebesar 30%. Hal ini disebabkan karena jumlah serat yang digunakan sedikit sehingga efisiensi penyerapan tidak tinggi.
3. Korelasi perpindahan massa yang terjadi di dalam kontaktor membran serat berongga dengan pelarut MEA/DEA dapat dinyatakan dengan $Sh = 56,17\varphi^{-1,21} Re^{0,323}$
4. Kondisi optimum pada kontaktor membran serat berongga dalam variabel yang dilakukan dalam penelitian ini berada pada laju alir 400 ml/menit dan jumlah serat 40 yang menghasilkan nilai k_L sebesar 0.00244 cm/s dengan persentasi CO₂ yang terabsorpsi sebesar 93%.

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Dilakukan penelitian tentang jenis bahan membran yang baik untuk menaikkan batas kebasahan membran
2. Dilakukan penelitian lebih lanjut untuk umpan berupa gas campuran sehingga teknologi ini dapat diterapkan dalam industri terutama industri pengolahan gas alam.

DAFTAR PUSTAKA

- Dortmundt, D., & Kishore, D. (1999). Recent Development in CO₂ Removal Membrane Technology. *UOP Journal*.
- Kartohardjono,S., Anggara, Subihi & Yuliusman. (2007). Absorpsi CO₂ dari campurannya dengan CH₄ atau N₂ melalui kontaktor membran serat berongga menggunakan pelarut air. *Prosiding Seminar Design and Application of Technology*.
- Zhang Qi , E. L., & Cussler. (1985). Microporous hollow fiber for gas absorption: I. Mass transfer in the liquid. *Journal of Membrane Science*, 23, 321-332.
- Rangwala, R. (1996). Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Solutions Using Hollow Fiber Membrane Contactor. *Elsevier, Journal Membrane of Science*, 112, 229-240.
- Zhang,D.Q., Guo,T.M., & Knapp, H. (1997). Experimental and modeling studies on the solubility of CO₂, CHClF₂,CHF₃, C₂H₂F₄ and C₂H₄F₂ in water and aqueous NaCl solutions under low pressures. *Fluid Phase Equilib.*, 129, ,197-209.
- Gabelman,A., & Sun-Tak Hwang (1999). Hollow Fiber Membrane Contactors. *Journal of Membrane Science*, 159, 61-106.
- Zhang,H.Y., Wang,R., Liang ,D.T.,& Hwa,T.J. (2006). Modeling and experimental study of CO₂ absorption in a hollow fiber membrane contactor. *Journal of Membrane Science*.
- Seok Kim,Y.S.,& Yang,S.M. (2000). Absorption of carbon dioxide through hollow fiber membranes using various aqueous absorbents. *Separation and Purification Technology*.

- R. Wang, D. F. L., Zhou, C., Liu, M., & Liang, D.T. (2003). Impact of DEA solutions with and without CO₂ loading on porous polypropylene membranes intended for use as contactors. *Journal of Membrane Science*.
- Gong, Y., Wang, Z., & Wang, S. (2006). Experiments and simulation of CO₂ removal by mixed amines in a hollow fiber membrane module. *Chemical Engineering and Processing*.
- Rajabzadeha, S., Yoshimotoa, S., Teramotoa, M., Al-Marzouqib, M., & Matsuyama, H. (2009). CO₂ absorption by using PVDF hollow fiber membrane contactors with various membrane structures. *Separation and Purification Technology*.
- Treybal, Robert E. (1981), *Mass-Transfer Operations* (Third Edition edn.; Tokyo: McGraw-Hill International Book Company).
- Xu Shuo, Y. W. Wang, F.D. Otto, A.E. Mather (1996), *Chem. Eng. Sci.*
- Su-Hsia Lin., Pen-Chi Chiang., Chun-Fan Hsieh., Meng-Hui Li., & Kuo-Lun Tung (2008). Absorption of carbon dioxide by the absorbent composed of piperazine and 2-amino-2-methyl-1-propanol in PVDF membrane contactor. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineering* 39.
- Jimmy Xiao, C. W. Li., & Li, M.H. (2000). Kinetics of absorption of carbon dioxide into aqueous solutions of 2-amino-2-methyl-1-propanol + monoethanolamine. *Chem. Eng. Sci.*, 55, 161-175.
- C.H. Liao., & Li, M. H. (2002). Kinetics of absorption of carbon dioxide into aqueous solutions of monoethanolamine + N-methyldie-thanolamine. *Chem. Eng. Sci.*, 57, 4569-4582.
- Lu Jian-gang, C. M.-d., Yan, J., & Hui, Z. (2009). Membrane-based CO₂ absorption into blended amine solutions. *Journal of Fuel Chemistry And Technology*, 37.

Mulder, M. (1997) . Basic Principles of Membrane Technology. *Netherlands: Kluwer Academic Publisher.*

Wang,R., Zhang, H. Y., Feron, P.H.M.,& Liang, D.T. (2005). Influence of membrane wetting on CO₂ capture in microporous hollow fiber membrane contactors. *Journal of Membrane Science*, 46 , 33-40.

Teplyakov, V.V., Sostina, E.,Beckman,I.,&Netrusov,A.(1996). Integrated membrane system for gas separation in biotechnology potential and prospects. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 12, 477-485.

Modigella,M., Schumachera,M., Teplyakovb,V.V.,& Zenkevichc,V.B. (2008). A membrane contactor for efficient CO₂ removal in biohydrogen production. *Desalination*, 224.

Shui-ping Yan , Meng-Xiang Fang, Wei-Feng Zhang a, Shu-Yuan Wang b, Zhi-Kang Xu ,Zhong-Yang Luo , Ke-Fa Cen .(2007).Experimental study on the separation of CO₂ from flue gas using hollow fiber membrane contactors without wetting. *Fuel Processing Technology*, 88.

www.sasked.gov.sk.ca/docs/chemistry, diakses pada 26 Mei 2011 pukul 20.00

www.bpmigas.co.id, diakses pada 7 Juni 2012 pukul 19.00

LAMPIRAN A

DATA PENELITIAN

A.1 Studi Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Diethanolamine (DEA)

Jumlah Serat	Laju Alir (ml/menit)	pH awal	pH akhir	T awal (°C)	T akhir (°C)
20	200	11.45	11.37	28	29
20	250	11.45	11.38	28	29.5
20	300	11.45	11.39	28	29.5
20	350	11.45	11.4	28	29
20	400	11.45	11.4	28	29
30	200	11.45	11.36	28	29.5
30	250	11.45	11.37	28	29.5
30	300	11.45	11.38	28	29.5
30	350	11.45	11.39	28	29
30	400	11.45	11.4	28	29.5
40	200	11.45	11.35	28	29.5
40	250	11.45	11.36	28	29
40	300	11.45	11.38	28	29.5
40	350	11.45	11.39	28	29.5
40	400	11.45	11.39	28	29.5

A.2 Studi Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Campuran Monoethanolamine (MEA) dan Diethanolamine (DEA)

serat	laju	%DEA	%MEA	pH awal	pH akhir	T awal (°C)	T sampel (°C)
20	200	5	5	11.85	11.78	29	30.5
20	250	5	5	11.85	11.78	29	30.5
20	300	5	5	11.85	11.79	29	30.5
20	350	5	5	11.85	11.8	29	30
20	400	5	5	11.85	11.8	29	30.5
30	200	5	5	11.85	11.76	29	30
30	250	5	5	11.85	11.77	29	30
30	300	5	5	11.85	11.78	29	30.5
30	350	5	5	11.85	11.78	29	30
30	400	5	5	11.85	11.8	29	30
40	200	5	5	11.85	11.75	29	30
40	250	5	5	11.85	11.76	29	30.5
40	300	5	5	11.85	11.77	29	30.5
40	350	5	5	11.85	11.78	29	30.5
40	400	5	5	11.85	11.79	29	30.5

LAMPIRAN B

CONTOH PERHITUNGAN

B.1 Perhitungan Studi Perpindahan Massa dan Korelasi Perpindahan Massa untuk Pelarut Diethanolamine (DEA)

Berikut adalah contoh perhitungan untuk menghitung koefisien perpindahan massa untuk pelarut DEA dengan data-data penelitian sebagai berikut :

Jumlah serat = 20

$Q_L = 200$ mL/menit

pH awal = 11.45

pH akhir = 11.37

T awal = 28 °C

T akhir = 29 °C

Berdasarkan literatur, tetapan kesetimbangan basa (K_b) untuk DEA = 0.000008433 mol/L.

B.1.2 Menghitung konsentrasi DEA pada larutan awal

pH awal larutan = 11.45

pOH awal = 14 – pH awal = 14-11.45 = 2.55

$[OH^-] = 10^{-(pOH)} = 10^{-2.55} = 0.00282$ mol/L

$[OH^-] = \sqrt{K_b \times M_{DEA}}$

$$M_{DEA} = \frac{[OH^-]^2}{K_b} = \frac{(0.00282 \frac{mol}{L})^2}{0.000008433 \text{ mol/L}} = 0.94193 \text{ mol/L}$$

B.1.3 Menghitung konsentrasi DEA pada larutan sampel

pH akhir larutan = 11.37

pOH akhir = 14 – pH akhir = 14-11.2 = 2.63

$[OH^-] = 10^{-(pOH)} = 10^{-2.63} = 0.00234$ mol/L

$[OH^-] = \sqrt{K_b \times M_{DEA}}$

$$M_{DEA} = \frac{[OH^-]^2}{K_b} = \frac{(0.00234 \frac{mol}{L})^2}{0.000008433 \text{ mol/L}} = 0.651655 \text{ mol/L}$$

B.1.4 Menghitung Konsentrasi CO₂ mula-mula

Konsentrasi CO₂ mula-mula (C₀) diasumsikan = 0 karena pada keadaan awal belum terdapat CO₂ yang diabsorpsi DEA.

B.1.5. Menghitung Konsentrasi CO₂ yang terserap oleh larutan DEA

Konsentrasi CO₂ yang terserap dan bereaksi dengan DEA didapatkan secara stoikiometri dengan menghitung jumlah DEA yang bereaksi dan perbandingan koefisiennya dengan CO₂

Konsentrasi DEA yang bereaksi = M_{DEA} awal - M_{DEA} akhir

$$= 0.94193 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0.651655 \frac{\text{mol}}{\text{L}} = 0.290273 \text{ mol/L}$$

$$\text{Konsentrasi CO}_2 \text{ yang bereaksi} = \frac{M_{DEA} \text{ akhir} - M_{DEA} \text{ awal}}{2} = \frac{0.290273 \frac{\text{mol}}{\text{L}}}{2} = 0.14514 \text{ mol/L}$$

Jadi konsentrasi CO₂ yang terserap dan bereaksi dengan DEA = 0.14514 mol/L

B.1.6 Menghitung Konsentrasi CO₂ dalam Keadaan Setimbang Dengan DEA (C*)

$$C^* = \frac{1}{2} M_{DEA} \text{ awal} = \frac{1}{2} * 0.94193 \frac{\text{mol}}{\text{L}} = 0.47096421 \text{ mol/L}$$

B.1.7 Menghitung Koefisien Perpindahan Massa Untuk Pelarut DEA

Koefisien perpindahan massa dapat dihitung dengan :

$$k_L = \frac{Q}{A} \ln \frac{[C^* - C_0]}{[C^* - C_1]}$$

Dimana,

$$A = n \pi d_f L = 20 \times 3.14 \times 0.0015 \times 0.4 = 0.04 \text{ m}^2$$

$$Q_L = 20 \text{ ml/menit} = 3.3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

C₁ = konsentrasi CO₂ yang terserap

$$k_L = \frac{3.3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}}{0.04 \text{ m}^2} \ln \frac{[0.857 \text{ mol/L} - 0]}{[0.857 \text{ mol/L} - 0.708082 \text{ mol/L}]} 100 \frac{\text{cm}}{\text{m}} = 0.00326 \text{ cm/s}$$

B.1.8 Menghitung Fluks Perpindahan Massa (J) untuk pelarut DEA

Fluks perpindahan massa dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$J = k_L (C^* - C_1)$$

$$J = 0.00326 \frac{cm}{s} \times (0.47096421 \frac{mol}{L} - 0.14514 \frac{mol}{L}) \times \left(\frac{1}{1000} \frac{L}{cm^3} \right) = 1.06192 \times 10^{-6} mol/cm^2s$$

B.1.9 Perhitungan Bilangan Sherwood (Sh)

Perhitungan bilangan sherwood merupakan implementasi dari korelasi perpindahan massa. Bilangan Sherwood dapat dihitung dengan persamaan :

$$Sh = k_L \frac{d_e}{D}$$

Berikut langkah-langkah perhitungan bilangan sherwood :

Menghitung faktor kekosongan

$$\varepsilon = 1 - N_{\text{fiber}} \left(\frac{d_f}{d_{i,\text{modul}}} \right)^2$$

$$\varepsilon = 1 - 20 \left(\frac{0.0015 \text{ m}}{0.024 \text{ m}} \right)^2$$

$$\varepsilon = 0.921875$$

Menghitung nilai diameter ekuivalen (d_e)

$$d_e = \frac{d_f}{\sqrt{1 - \varepsilon}}$$

$$d_e = \frac{0.0015 \text{ m}}{\sqrt{1 - 0.921875}} = 5.37 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Menghitung nilai difusivitas (D)

$$\frac{D_1 T_1}{\mu_1} = \frac{D_2 T_2}{\mu_2}$$

Dimana,

D_1 = difusivitas pada suhu 25 °C = $1.96 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

D_2 = difusivitas sampel pada suhu tertentu (m^2/s)

T_1 = 25°C = 298.15 K

T_2 = suhu sampel = 29 °C = 302.15 K

μ_1 = viskositas pada suhu 25°C (cp) = 0.8904 cp

μ_2 = viskositas pada suhu tertentu / sampel (cp)

Berdasarkan literatur (Chih-Hao Hsu dan Meng-Hui Li 1997), viskositas larutan DEA 10% pada suhu 302.15 K adalah 1.049 cp.

Maka nilai difusivitas :

$$\frac{D_1 T_1}{\mu_1} = \frac{D_2 T_2}{\mu_2}$$

$$\frac{1.96 \times 10^{-9} \times 298.15}{0.8904} = \frac{D_2 \times 302.15}{1.049}$$

$$D_2 = 2.278 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

Menghitung Bilangan Sherwood

$$Sh = k_l \frac{d_e}{D}$$

$$Sh = 0.00326 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \left(\frac{5.37 \times 10^{-3} \text{ m}}{2.278 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}} \right) \frac{100 \frac{\text{cm}}{\text{m}}}{10000 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^2}} = 76.7611$$

Menghitung bilangan reynold

Perhitungan bilangan Reynold aliran gas CO₂ menggunakan persamaan berikut ini :

$$Re = \frac{d_e \rho v}{\mu}$$

Menghitung kecepatan alir gas CO₂ :

$$V_G = \frac{Q}{A_{flow}}$$

$$A_{flow} = \frac{1}{4} \pi (d_s^2 - n d_f^2)$$

Dimana,

d_f = diameter dalam fiber

$$Q_G = 3.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_{flow} = \frac{1}{4} \times 3.14 \times ((0.024)^2 - (20 \times (0.0013)^2))$$

$$A_{\text{flow}} = 4.17 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Sehingga,

$$V_G = \frac{3.3 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1000000 \frac{\text{cm}^3}{\text{m}^3}}{4.17 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot 10000 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^2}} =$$

$$V_G = 0.7832 \text{ cm/s}$$

Setelah nilai V_G diketahui, maka bilangan Re untuk gas CO_2 dengan laju alir $300 \text{ cm}^3/\text{min}$ pada modul dengan jumlah serat 20 dapat dihitung sebagai berikut :

$$Re = \frac{d_e \rho v}{\mu}$$

$$Re = \frac{5.37 \times 10^{-3} \text{m} \times 1008.921 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.7832 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot \frac{1}{100} \frac{\text{m}}{\text{cm}}}{0.00105 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}}$$

$$Re = 40.38$$

B.2. Perhitungan Studi Perpindahan Massa Dan Korelasi Perpindahan Massa Untuk Pelarut Campuran MEA-DEA

Berikut adalah contoh perhitungan untuk menghitung koefisien perpindahan massa untuk pelarut campuran MEA-DEA dengan data-data penelitian sebagai berikut :

$$\text{Jumlah serat} = 20$$

$$Q_L = 200 \text{ mL/min}$$

$$\text{pH awal} = 11.85$$

$$\text{pH akhir} = 10.78$$

$$T \text{ awal} = 29 \text{ }^\circ\text{C} = 302.15 \text{ K}$$

$$T \text{ akhir} = 30.5 \text{ }^\circ\text{C} = 303.65 \text{ K}$$

B.2.1 Menghitung konsentrasi MEA dan DEA pada larutan awal

Perhitungan konsentrasi MEA dan DEA awal didasari pada pengertian bahwa mol $[\text{OH}]^-$ larutan sampel yang diukur merupakan jumlah dari $[\text{OH}]^-_{\text{MEA}}$ dan $[\text{OH}]^-_{\text{DEA}}$.

$$\text{pH awal} = 11.85$$

$$\text{pOH} = 14 - \text{pH} = 14 - 11.85 = 2.15$$

$$[\text{OH}]^- = 10^{-(\text{pOH})} = 10^{-2.15} = 0.0078 \text{ mol/L}$$

$$[\text{OH}]^- \text{ sampel} = [\text{OH}]^-_{\text{MEA}} + [\text{OH}]^-_{\text{DEA}}$$

$$[OH]^- \text{ sampel} = \sqrt{K_b \text{ MEA} M_{\text{MEA}}} + \sqrt{K_b \text{ DEA} M_{\text{DEA}}}$$

Perbandingan berat MEA dan DEA yang dipakai = 5% : 5% = 1 : 1

$$\text{Perbandingan mol MEA dan DEA yang dipakai} = \frac{1}{M_{\text{MEA}}} : \frac{1}{M_{\text{DEA}}} = \frac{1}{61.08} : \frac{1}{105.14} = 17.2 : 10$$

Dengan menggunakan perbandingan di atas :

$$\frac{M_{\text{MEA}}}{M_{\text{DEA}}} = \frac{17.2}{10}$$

$$M_{\text{DEA}} = 1.72 M_{\text{MEA}}$$

$$[OH]^- \text{ sampel} = \sqrt{K_b \text{ MEA} M_{\text{MEA}}} + \sqrt{K_b \text{ DEA} 1.72 M_{\text{MEA}}}$$

$$[OH]^- \text{ sampel} = \sqrt{M_{\text{MEA}}} (\sqrt{K_b \text{ MEA}} + \sqrt{K_b \text{ DEA} 1.72})$$

$$[OH^-]^2 \text{ sampel} = M_{\text{MEA}} (\sqrt{K_b \text{ MEA}} + \sqrt{K_b \text{ DEA} 1.72})^2$$

$$M_{\text{MEA}} = \frac{[OH^-]^2 \text{ sampel}}{(\sqrt{K_b \text{ MEA}} + \sqrt{K_b \text{ DEA} 1.72})^2}$$

$$M_{\text{MEA}} = \frac{[OH^-]^2 \text{ sampel}}{(\sqrt{K_b \text{ MEA}} + \sqrt{K_b \text{ DEA} 1.72})^2}$$

Berdasarkan literatur, $K_b \text{ MEA} = 3.2 \times 10^{-5}$ dan $K_b \text{ DEA} = 8.4 \times 10^{-6}$

Maka,

$$M_{\text{MEA}} = \frac{[0.0078]^2}{(\sqrt{3.2 \times 10^{-5}} + \sqrt{8.4 \times 10^{-6} \cdot 1.72})^2} = 1.37313 \text{ mol/L}$$

$$M_{\text{DEA}} = 1.72 M_{\text{MEA}} = 1.72 \times 1.37313 \text{ mol/L} = 0.797708995 \text{ mol/L}$$

B.2.2 Menghitung konsentrasi MEA dan DEA pada larutan sampel

Perhitungan konsentrasi MEA dan DEA sampel dilakukan sama seperti perhitungan konsentrasi MEA dan DEA awal.

$$\text{pH akhir} = 11.78$$

$$\text{pOH} = 14 - \text{pH} = 14 - 11.78 = 2.22$$

$$[OH^-] = 10^{-(\text{pOH})} = 10^{-2.22} = 0.00603 \text{ mol/L}$$

$$M_{MEA} = \frac{[OH^-]^2 \text{ sampel}}{(\sqrt{K_b \text{ MEA}} + \sqrt{K_b \text{ DEA} \cdot 1.72})^2}$$

Maka,

$$M_{MEA} = \frac{[0.00603]^2}{(\sqrt{3.2 \times 10^{-5}} + \sqrt{8.4 \times 10^{-6} \cdot 1.72})^2} = 0.99475 \text{ mol/L}$$

$$M_{DEA} = 1.72 M_{MEA} = 1.72 \times 0.99475 \text{ mol/L} = 0.57789 \text{ mol/L}$$

B.2.3 Menghitung konsentrasi CO₂ yang terserap di larutan sampel

Konsentrasi CO₂ yang terserap pada larutan sampel merupakan jumlah dari konsentrasi CO₂ yang terserap oleh MEA dan DEA yaitu selisih dari konsentrasi senyawa pada larutan awal dan larutan sampel. Dengan melihat perbandingan koefisien pada persamaan reaksi, maka

$$C_{CO_2 \text{ pada MEA}} = \frac{M_{MEA \text{ awal}} - M_{MEA \text{ sampel}}}{2}$$

$$C_{CO_2 \text{ pada MEA}} = \frac{1.37313 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0.99475 \frac{\text{mol}}{\text{L}}}{2} = 0.18919 \text{ mol/L}$$

$$C_{CO_2 \text{ pada DEA}} = \frac{M_{DEA \text{ awal}} - M_{DEA \text{ sampel}}}{2}$$

$$C_{CO_2 \text{ pada DEA}} = \frac{0.797708 \text{ mol/L} - 0.57789 \text{ mol/L}}{2} = 0.1099 \text{ mol/L}$$

Total CO₂ yang terserap = $C_{CO_2 \text{ pada MEA}} + C_{CO_2 \text{ pada DEA}}$

$$= 0.18919 \frac{\text{mol}}{\text{L}} + 0.1099 \frac{\text{mol}}{\text{L}} = 0.2991033 \text{ mol/L}$$

B.2.4 Menghitung konsentrasi CO₂ dalam Keadaan Setimbang Dengan MEA dan DEA (C*)

$$C^* = \frac{M_{MEA \text{ awal}}}{2} + \frac{M_{DEA \text{ awal}}}{2}$$

$$= \frac{1.37313 \frac{\text{mol}}{\text{L}}}{2} + \frac{0.797708 \frac{\text{mol}}{\text{L}}}{2} = 1.0854233 \text{ mol/L}$$

B.2.5 Menghitung Koefisien Perpindahan Massa Untuk Pelarut campuran MEA dan DEA

Koefisien perpindahan massa dapat dihitung dengan :

$$k_L = \frac{Q}{A} \ln \frac{[C^* - C_0]}{[C^* - C_1]}$$

Dimana,

$$A = n \pi d_f L = 20 \times 3.14 \times 0.0015 \times 0.4 = 0.04 \text{ m}^2$$

$$Q_L = 20 \text{ ml/menit} = 3.3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

C_1 = konsentrasi CO_2 yang terserap

$$\begin{aligned} k_L &= \frac{3.3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}}{0.04 \text{ m}^2} \ln \frac{[1.0854233 \text{ mol/L} - 0]}{[1.0854233 \text{ mol/L} - 0.2991033 \text{ mol/L}]} 100 \frac{\text{cm}}{\text{m}} \\ &= 0.00285 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

B.2.6 Menghitung Fluks Perpindahan Massa (J) untuk pelarut campuran MEA dan DEA

Fluks perpindahan massa dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$J = k_L (C^* - C_1)$$

$$\begin{aligned} J &= 0.00285 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \times (1.0854233 \text{ mol/L} - 0.2991033 \text{ mol/L}) \times \left(\frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ cm}^3} \right) = \\ &2.24239 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2\text{s} \end{aligned}$$

B.2.7 Perhitungan Bilangan Sherwood (Sh)

Perhitungan bilangan sherwood merupakan implementasi dari korelasi perpindahan massa. Bilangan Sherwood dapat dihitung dengan persamaan :

$$Sh = k_L \frac{d_e}{D}$$

Berikut langkah-langkah perhitungan bilangan sherwood :

Menghitung faktor kekosongan

$$\varepsilon = 1 - N_{\text{fiber}} \left(\frac{d_f}{d_{i,\text{modul}}} \right)^2$$

$$\varepsilon = 1 - 20 \left(\frac{0.0015 \text{ m}}{0.024 \text{ m}} \right)^2$$

$$\varepsilon = 0.921875$$

Menghitung nilai diameter ekuivalen (d_e)

$$d_e = \frac{d_f}{\sqrt{1 - \varepsilon}}$$

$$d_e = \frac{0.0015 \text{ m}}{\sqrt{1 - 0.921875}} = 5.37 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Menghitung nilai difusivitas (D)

$$\frac{D_1 T_1}{\mu_1} = \frac{D_2 T_2}{\mu_2}$$

Dimana,

D_1 = difusivitas pada suhu 25 °C = $1.96 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

D_2 = difusivitas sampel pada suhu tertentu (m^2/s)

$T_1 = 25^\circ\text{C} = 298.15 \text{ K}$

$T_2 = \text{suhu sampel} = 30.5 \text{ }^\circ\text{C} = 303.65 \text{ K}$

μ_1 = viskositas pada suhu 25°C (cp) = 0.8904 cp

μ_2 = viskositas pada suhu tertentu / sampel (cp)

Berdasarkan literatur (Robert E. Maples (2000), *Petroleum Refinery Process Economics*, 2nd Edition, Pennwell Books, ISBN 0-87814-779-9), viskositas larutan campuran DEA dan MEA pada suhu tertentu (30.5 °C) dapat dihitung dengan :

Menghitung nilai VBI (Viscosity Blending Index) untuk masing-masing senyawa

$$VBI = 14.534 \times \ln[\ln(v + 0.8)] + 10.975$$

Nilai v merupakan viskositas senyawa pada suhu tertentu.

Dari literatur, pada suhu 30.5 °C:

$v_{\text{H}_2\text{O}} = 0.7895$; $v_{\text{MEA}} = 16.969$; $v_{\text{DEA}} = 322.195$

Maka didapatkan nilai masing-masing VBI sebesar :

$VBI_{\text{H}_2\text{O}} = -0.2034$; $VBI_{\text{MEA}} = 26.3361$; $VBI_{\text{DEA}} = 36.46755$

Menghitung nilai VBI campuran (VBN)

$$VBN = [w_{\text{water}} \times VBI_{\text{water}}] + [w_{\text{MEA}} \times VBI_{\text{MEA}}] + [w_{\text{DEA}} \times VBI_{\text{DEA}}]$$

dimana nilai w adalah fraksi berat masing-masing senyawa dalam campuran

Maka didapatkan nilai VBN sebesar 2.957096

Menghitung nilai viskositas campuran

$$v = e^{\frac{VBN-10.975}{14.534}} - 0.8$$

Dimana e adalah bilangan euler. Maka dari persamaan diatas didapatkan nilai viskositas campuran sebesar 0.978890458

Maka nilai difusivitas :

$$\frac{D_1 T_1}{\mu_1} = \frac{D_2 T_2}{\mu_2}$$
$$\frac{1.96 \times 10^{-9} \times 298.15}{0.8904} = \frac{D_2 \times 303.65}{0.978890458}$$
$$D_2 = 2.11576 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

Menghitung Bilangan Sherwood

$$Sh = k_l \frac{d_e}{D}$$
$$Sh = 0.00285 \text{ cm/s} \left(\frac{5.37 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot 100 \frac{\text{cm}}{\text{m}}}{2.11576 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot 10000 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^2}} \right) = 72.3338$$

Menghitung bilangan reynold

Perhitungan bilangan Reynold aliran gas CO₂ menggunakan persamaan berikut ini :

$$Re = \frac{d_e \rho v}{\mu}$$

Menghitung kecepatan alir gas CO₂ :

$$v_G = \frac{Q}{A_{flow}}$$
$$A_{flow} = \frac{1}{4} \pi (d_s^2 - n d_f^2)$$

Dimana,

df = diameter dalam fiber

$$Q_G = 3.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_{flow} = \frac{1}{4} \times 3.14 \times ((0.024)^2 - (20 \times (0.0013)^2))$$

$$A_{flow} = 4.256 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Sehingga,

$$v_G = \frac{3.3 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 1000000 \frac{\text{cm}^3}{\text{m}^3}}{4.256 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 10000 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^2}}$$

$$V_G = 0.78315 \text{ m/s}$$

Setelah nilai V_G diketahui, maka bilangan Re untuk gas CO_2 dengan laju alir $300 \text{ cm}^3/\text{min}$ pada modul dengan jumlah serat 20 dapat dihitung sebagai berikut :

$$Re = \frac{d_e \rho v}{\mu}$$

Dimana,

$$\rho : \text{massa jenis larutan campuran MEA dan DEA} = 1007.36 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu : \text{viskositas larutan campuran MEA dan DEA} = 0.978890458 \text{ cp} = 0.0009788 \text{ kg/ms}$$

$$Re = \frac{5.37 \times 10^{-3} \text{ m} \times 1007.36 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.78315 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \times \frac{1}{100} \frac{\text{m}}{\text{cm}}}{0.0009788 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}}$$

$$Re = 43.2512$$