



UNIVERSITAS INDONESIA

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

SKRIPSI

ANTONIUS ERIEK AFINDO NAIBAHO

0806332793

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA TEKNIK KIMIA
UNIVERSITAS INDONESIA**

DEPOK

JULI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

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

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana

ANTONIUS ERIEK AFINDO NAIBAHO

0806332793

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA TEKNIK KIMIA
UNIVERSITAS INDONESIA**

DEPOK

JULI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Antonius Eriek Afindo Naibaho
NPM : 0806332793
Tanda Tangan : 
Tanggal : 4 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Antonius Eriek Afindo Naibaho
NPM : 0806332793
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Absorpsi CO₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga
Menggunakan Larutan Penyerap Campuran Senyawa
Amina (MEA/DEA) : Variasi Komposisi Amina

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 : Prof. Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc., Ph.D

Penguji : Prof. Dr. Ir. Mohammad Nasikin, M. Eng

Penguji : Ir. Yuliusman, M. Eng

Penguji : Eva Fathul Karamah, S.T, M.T

Ditetapkan di : Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas
Indonesia, Depok.

Tanggal : 4 Juli 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 W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
- (2) Prof. Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (3) Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA selaku dosen pembimbing akademik yang telah menyediakan waktu dan membantu permasalahan akademik perkuliahan selama ini;
- (4) Ir. Yuliusman M.Eng selaku kordinator mata kuliah spesial Teknik Kimia FTUI;
- (5) Para dosen Departemen Teknik Kimia FTUI yang telah memberikan ilmu dan wawasannya;
- (6) Bapak Wanizal, Bapak Jajat, Bapak Eko, dan Ibu Pratiwi yang sangat membantu terselesaikannya skripsi ini;
- (7) Keluarga yang selalu memberikan doa, dukungan, dan semangat;
- (8) Rekan satu bimbingan dan satu *research grup* Proses Intensifikasi.
- (9) Teman-teman sepermainan, satu angkatan 2008, dan satu Departemen Teknik Kimia FTUI.
- (10) Semua pihak yang telah membantu penyusunan makalah skripsi ini secara langsung maupun tidak langsung;

Penulis menyadari bahwa dalam makalah skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sehingga dapat menyempurnakan skripsi ini dan melaksanakan perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dan bagi dunia pendidikan dan ilmu pengetahuan.

Depok, Juli 2012

Antonius Eriek Afindo Naibaho



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Antonius Eriek Afindo Naibaho
NPM : 0806332793
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

ABSORPSI CO₂ MELALUI KONTAKTOR MEMBRAN SERAT BERONGGA MENGGUNAKAN LARUTAN PENYERAP CAMPURAN SENYAWA AMINA (MEA/DEA) : VARIASI KOMPOSISI AMINA

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pengkalan 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 : 4 Juli 2012

Yang menyatakan



(Antonius Eriek Afindo Naibaho)

ABSTRAK

Nama : Antonius Eriek Afindo Naibaho
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Absorpsi CO₂ Melalui Kontakor Membran Serat Berongga Menggunakan Larutan Penyerap Campuran Senyawa Amina (MEA/DEA) : Variasi Komposisi Amina

Dalam rentang 20 tahun terakhir, berbagai penelitian menyebutkan bahwa kontakor membran serat berongga dapat menjadi kontakor gas-cair yang menjanjikan di tengah berbagai kendala pada kontakor kolom konvensional. Namun, kualitas produk yang belum maksimal menuntut penelitian lanjut akan pelarut yang lebih kuat menyerap CO₂. Untuk itu, penelitian ini mengevaluasi pelarut campuran Monoethanolamine dan Diethanolamine sebagai pelarut baru dalam percobaan absorpsi gas CO₂ murni. Membran yang digunakan terbuat dari PVC dengan diameter luar 0,0015 m dan diameter dalam 0,0013 m. Hasil penelitian menyebutkan konsentrasi terbaik adalah 6%MEA+4%DEA (persen berat) dengan nilai kapasitas penyerapan sebesar 1,66 cm³/s dan dengan jumlah serat 40, pelarut ini mampu menyerap CO₂ hingga 85,57%.

Kata kunci : Kontakor membran, absorpsi CO₂, pelarut amina, DEA, MEA

ABSTRACT

Name : Antonius Eriek Afindo Naibaho
Major : Chemical Engineering
Title : CO₂ Absorption Through Hollow Fiber Membrane Contactor Using Mixed Amine as Solvent (MEA/DEA) : The Effect of Amine Composition

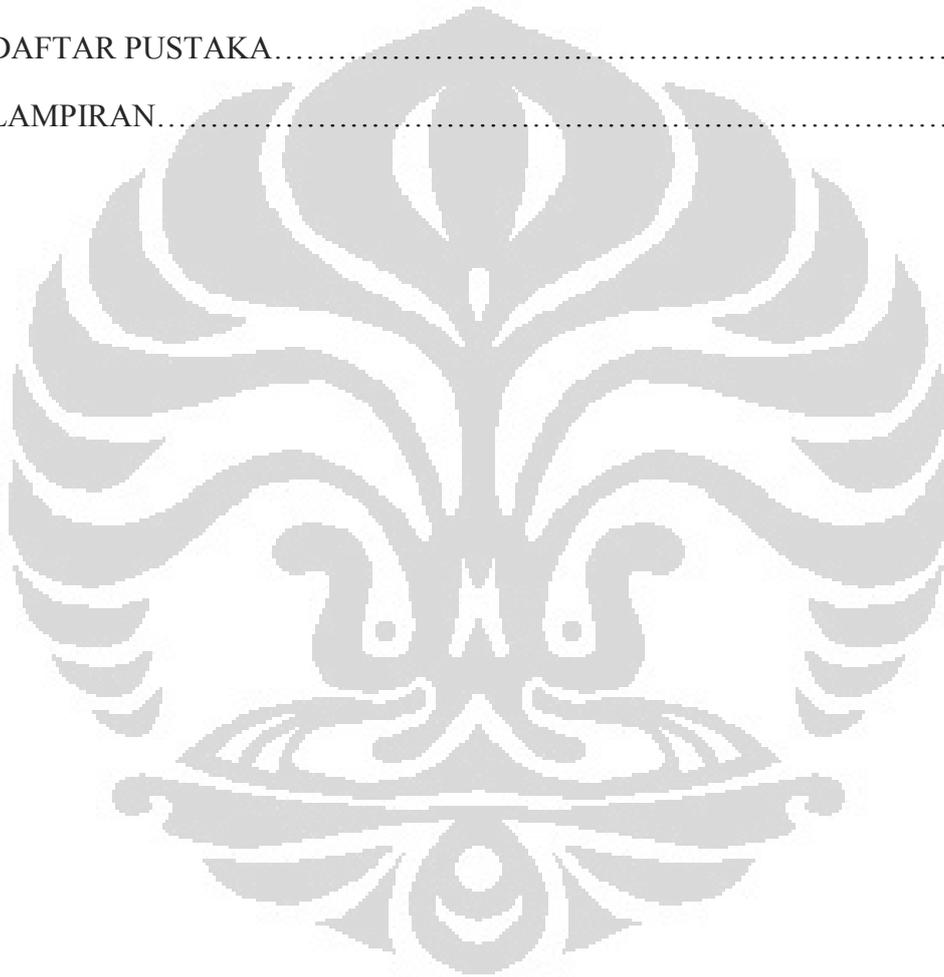
For recent 20 years, several researches stated that hollow fiber membrane contactor has been very promising to be gas-liquid contactor for CO₂ absorption. But in some applications and researches, the result found that this contactor still have a problem: low quality product which correspondence to the unsatisfied solvent. This research was aimed to evaluate the performance of mix amine (MEA and DEA) as solvent to absorb pure CO₂ through PVC hollow fiber membrane. The inner and outer diameters were 0.0015 m and 0.0013 m respectively. The result showed that the best composition for solvent was 6%MEA + 4%DEA (%wt) with the value of k_{LA} was 1,66 cm³/s. By using 40 fibers, this solvent could absorb 85.57% CO₂.

Keyword : membrane contactor, CO₂ absorption, amine solvent, DEA, MEA

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAM PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 CO ₂ dalam Gas Alam.....	7
2.2 Teknologi Pemisahan CO ₂ dari Gas Alam.....	10
2.3 Absorpsi CO ₂ Menggunakan Kontaktor Membran Serat Berongga..	12
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN.....	24
3.1 Pendahuluan.....	24
3.2 Rancangan Penelitian.....	24

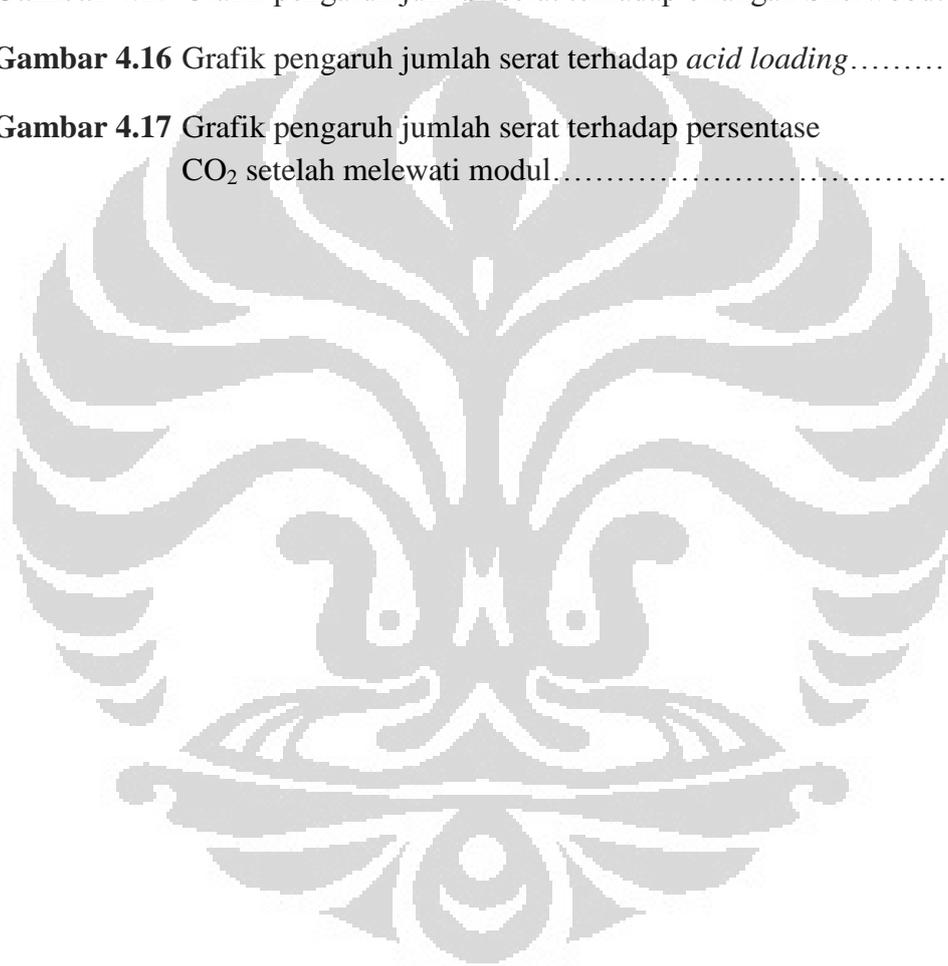
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	30
4.1 Pengaruh Komposisi Amina pada Perpindahan Massa.....	30
4.2 Pengaruh Jumlah Serat pada Perpindahan Massa.....	39
4.3 Analisa Hasil Percobaan.....	44
 BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	 48
5.1 Kesimpulan.....	48
5.2 Saran.....	48
 DAFTAR PUSTAKA.....	 49
LAMPIRAN.....	52



DAFTAR GAMBAR

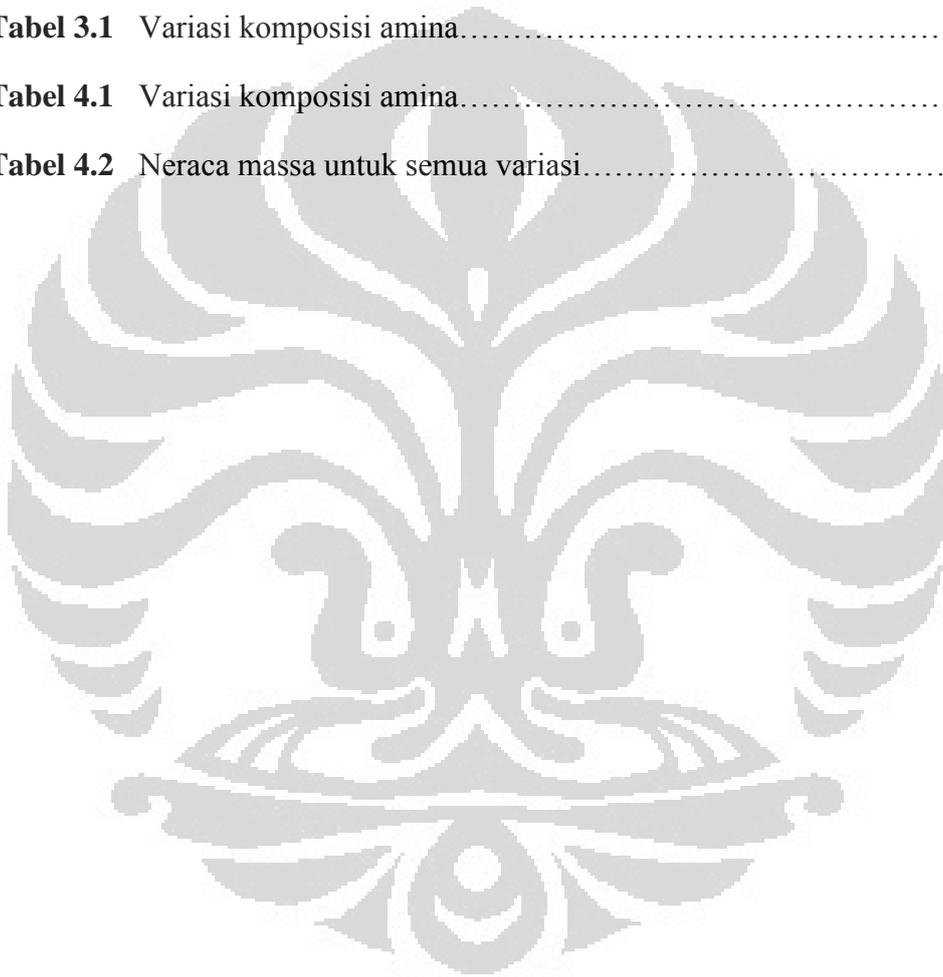
Gambar 2.1	Densitas dan harga Z dari CO ₂ – CH ₄ pada suhu 40° C.....	8
Gambar 2.2	Densitas dan viskositas dari CO ₂ – CH ₄ pada suhu 40° C.....	9
Gambar 2.3	Perbandingan permeabilitas senyawa-senyawa dalam gas alam.....	10
Gambar 2.4	Kontaktor Membran Serat Berongga.....	13
Gambar 2.5	Struktur kimia membran PVC.....	14
Gambar 2.6	Studi Perpindahan Massa Kontaktor Membran.....	16
Gambar 2.7	Perubahan fluks CO ₂ akibat degradasi membran oleh MEA.....	20
Gambar 2.8	Pengcilan porositas membran sebelum terkontak amina (a) dan setelah terkontak dengan amina konsentrasi 20% berat (b)..	21
Gambar 3.1	Alur Penelitian.....	24
Gambar 3.2	Skema modul membran.....	26
Gambar 3.3	Skema Alat Penelitian.....	26
Gambar 4.1	Pengaruh komposisi amina terhadap k_L	31
Gambar 4.2	Absorpsi CO ₂ melalui kontaktor membran serat berongga.....	32
Gambar 4.3	Konfigurasi aliran pada sistem absorpsi CO ₂ melalui kontaktor membran serat berongga.....	32
Gambar 4.4	Simulasi konsentrasi CO ₂ dan pelarut AMP sepanjang serat.....	33
Gambar 4.5	Profil Konsentrasi CO ₂ terhadap koordinat radial serat pada jenis pelarut yang berbeda.....	34
Gambar 4.6	Profil Konsentrasi CO ₂ terhadap koordinat radial serat pada konsentrasi pelarut yang berbeda.....	34
Gambar 4.7	Pengaruh ketebalan lapisan film fasa cair terhadap luas kontak efektif.....	35
Gambar 4.8	Grafik persentase CO ₂ setelah melewati modul.....	36
Gambar 4.9	Grafik pengaruh komposisi amina terhadap fluks CO ₂	37

Gambar 4.10 Grafik pengaruh komposisi amina terhadap bilangan Sherwood.....	38
Gambar 4.11 Grafik pengaruh komposisi amina terhadap <i>acid loading</i>	39
Gambar 4.12 Grafik pengaruh jumlah serat terhadap k_L	40
Gambar 4.13 Grafik pengaruh jumlah serat terhadap kapasitas penyerapan...	40
Gambar 4.14 Grafik pengaruh jumlah serat terhadap fluks CO_2	41
Gambar 4.15 Grafik pengaruh jumlah serat terhadap bilangan Sherwood.....	42
Gambar 4.16 Grafik pengaruh jumlah serat terhadap <i>acid loading</i>	43
Gambar 4.17 Grafik pengaruh jumlah serat terhadap persentase CO_2 setelah melewati modul.....	44



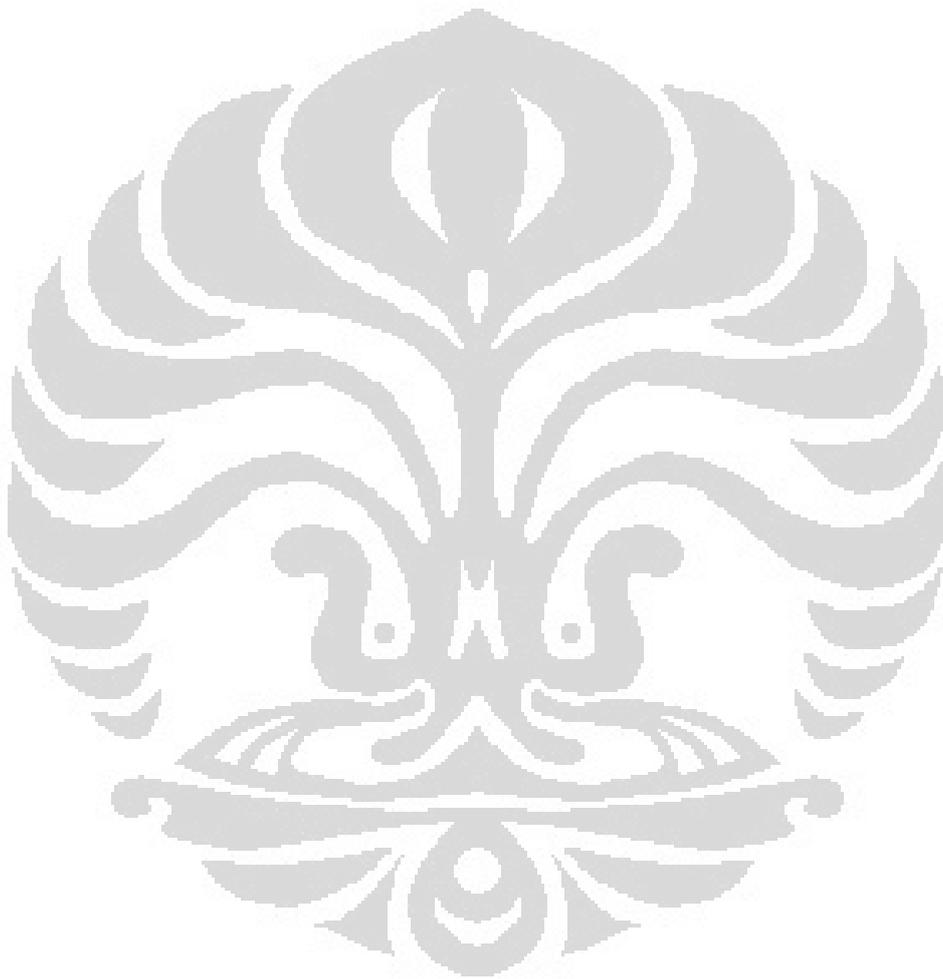
DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Proyeksi Energi Primer Indonesia.....	1
Tabel 2.1	Komposisi Gas Sumur Dayung dan Sumpal (Conoco Philips).....	8
Tabel 2.2	Perbandingan sifat / karakteristik MEA, DEA, dan MDEA.....	19
Tabel 2.3	State of the Art.....	22
Tabel 3.1	Variasi komposisi amina.....	27
Tabel 4.1	Variasi komposisi amina.....	30
Tabel 4.2	Neraca massa untuk semua variasi.....	44



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Data Penelitian.....	52
Lampiran B	Perhitungan.....	53



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang mempunyai cadangan gas alam yang cukup besar. Di tengah kondisi harga minyak bumi mentah yang tidak stabil dan kebutuhan energi yang semakin meningkat, gas alam ini menjadi energi alternatif yang sangat dibutuhkan. Berdasarkan data Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2006 – 2025, kebutuhan energi bersumber dari gas alam akan meningkat dan bersama-sama dengan batubara menjadi alternatif energi utama untuk minyak bumi.

Tabel 1.1 Proyeksi Energi Primer Indonesia

Jenis Energi	Tahun				
	2005	2010	2015	2020	2025
Minyak bumi	514.8	764.1	1144.9	1901.5	3469.7
Gas bumi	275.7	336.6	363.9	520.4	577.2
Batubara	152.6	258.6	472.4	733.1	969.1

Dalam satuan juta SBM (Setara Barel Minyak)

Sumber : Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2006 – 2025

Sebagai alternatif energi utama, kualitas gas juga penting untuk ditingkatkan, dan di sisi lain, harga produk gas alam juga diharapkan dapat bersaing. Di mana dalam hal ini, proses pemurnian gas alam dari kontaminan memiliki porsi yang besar dalam mempengaruhi harga gas alam. Sehingga dengan ditemukannya teknologi pemurnian gas alam yang ekonomis dan efisien, kualitas dan harga gas alam dapat jauh lebih baik dan mendukung dalam pemenuhan kebutuhan energi bangsa.

Dalam hal pemurnian gas, komposisi gas alam di Indonesia umumnya mengandung kontaminan CO₂ yang besar dan dominan. Salah satu contohnya adalah gas alam di Cepu memiliki kandungan gas CO₂ 30 % dan di Natuna mencapai 70%. Keberadaan gas CO₂ ini merugikan dalam berbagai aspek teknis dan kualitas produk. Sifatnya yang asam dapat menyebabkan korosi pada utilitas pabrik, komposisinya yang besar menyebabkan pengurangan kapasitas pabrik secara signifikan, dan pada suhu yang rendah dapat terbentuk *icing* yang akan menyumbat perpipaan dan *heat exchanger* (Dortmundt 1999). Selain itu, kandungan CO₂ yang tinggi dalam hidrokarbon menyebabkan nilai kalor dari gas

menurun dan tidak disukai di pasar/konsumen. Oleh karena itulah, pemurnian gas dari CO₂ menjadi salah satu proses yang sangat penting dalam pengolahan gas.

Berbagai teknologi telah digunakan dalam proses pemisahan CO₂ dari gas alam seperti absorpsi, adsorpsi, distilasi kriogenik, dan teknologi membran. Untuk adsorpsi, penyerapan CO₂ belum begitu efisien serta regenerasi yang sulit dan untuk distilasi kriogenik dibutuhkan instalasi yang sangat besar dan biaya operasi yang sangat besar pula. Sedangkan untuk teknologi membran, penurunan tekanan yang terjadi sangat besar, selektivitasnya yang buruk menyebabkan banyak kerugian di mana hidrokarbon yang ikut lolos bersama-sama dengan CO₂ (Wallace 2005). Sampai saat ini absorpsi sebenarnya masih menjadi pilihan yang baik, namun pada kolom absorpsi konvensional terdapat banyak kelemahan yaitu terjadinya *entrainment, flooding, loading*, dan *foaming* (Cooney 1989). Selain itu, kolom absorber membutuhkan energi yang besar, instalasinya besar, dan tergantung pada unit-unit operasi lain. Kekurangan-kekurangan ini mendorong penelitian ke arah teknologi kontaktor baru yang diharapkan dapat menganggulangi masalah di atas.

Metode baru dalam mengontakkan pelarut dengan CO₂ adalah dengan menggunakan kontaktor membran serat berongga. Metode ini mempunyai kelebihan-kelebihan seperti tidak mencemari lingkungan, mudah diaplikasikan dengan unit lain, *low maintenance*, hemat energi, mudah untuk *scale-up*, dan aplikatif pada pengolahan gas alam. Kontaktor membran telah diteliti secara intensif sejak pertengahan tahun 1980 untuk aplikasi separasi yang sangat luas, meliputi separasi racemic leucine (Ding 1992), penghilangan ethanol dari hasil fermentasi (Matsumura 1986, Vatai 1991), ekstraksi asam mevinolinic (Prasad 1989), ekstraksi logam dari limbah industri (Juang 2003, Yang 1996, Yoshizuka 1986, Yun 1993), pengambilan sulfur dari limbah industri (Pierre 2001, Pierre 2002, Souchon 2004), dan terakhir absorpsi gas (Karooor 1993, Jiang-gang 2009).

Proses pemisahan menggunakan membran serat berongga sebagai kontaktor absorpsi gas-cair berprinsip hampir mirip dengan ekstraksi komponen gas ke dalam pelarut. Permukaan dinding dari membran yang berpori (50 Å – 100 µm) menjadi tempat kontak sekaligus pembatas antara fasa gas dan cair. *Driving force* dari perpindahan massa itu sendiri adalah perbedaan konsentrasi serta

tekanan. Bentuknya berupa serat-serat memberikan luas kontak gas-cair yang sangat besar. Jika luas permukaan spesifik dari kontakor kolom sebesar 30 – 300 m^2/m^3 , maka kontakor membran serat berongga mempunyai luas permukaan spesifik 1600 – 33000 m^2/m^3 .

Namun, teknologi kontakor membran serat berongga untuk absorpsi CO_2 ini masih memiliki kelemahan dibanding kontakor kolom yaitu kualitas produk yang dihasilkan masih lebih rendah. Kualitas produk dari absorpsi dengan kontakor membran ini dapat diukur dengan konsentrasi CO_2 dalam produk. Dalam hal ini, kontakor membran dapat memurnikan gas hingga $\pm 10\%$ CO_2 (Gong 2006), tapi kemurnian masih jauh jika dibandingkan dengan kontakor kolom yang dapat mencapai angka $\pm 2\%$ CO_2 . Hal ini dikarenakan belum ditemukannya pelarut yang paling tepat untuk digunakan. Pada tahun 2007, sebuah penelitian menyebutkan absorben yang dapat digunakan dalam absorpsi CO_2 menggunakan kontakor membran serat berongga ini adalah air, NaOH, KOH, MEA, DEA, MDEA, K_2CO_3 , garam dari asam amina (Lua 2007), dan disebutkan juga bahwa pelarut alkanamina masih menjadi pelarut yang paling baik.

Amina primer (MEA) adalah penyerap CO_2 yang paling baik, namun ditemukan bahwa penggunaan konsentrasi MEA yang tinggi justru tidak berpengaruh signifikan terhadap penambahan daya absorpsi CO_2 (Kim 2000). Amina sekunder (DEA) memiliki potensi serap yang juga baik, namun tidak sebaik MEA. Untuk amina tersier (MDEA) daya penyerapannya sangat lemah (Lua 2007). Di tengah keterbatasan kemampuan penyerapan pelarut tunggal ini, diketahui pelarut campuran dua senyawa amina memiliki kemampuan penyerapan yang lebih baik dibanding pelarut tunggal (Lin 2009). Sehingga penelitian ini bertujuan untuk menguji kemampuan absorpsi pelarut campuran amina, dalam hal ini MEA dan DEA.

Jika konsentrasi MEA terbatas pada konsentrasi efektifnya, maka untuk meningkatkan lagi daya ikat CO_2 , ditambahkan DEA yang memiliki daya serap baik dan tidak ditemukan adanya batasan konsentrasi efektif. Sesuai penjelasan di atas, dalam penelitian ini diteliti komposisi yang tepat untuk pelarut campuran MEA dan DEA untuk menghasilkan efektivitas absorpsi paling optimum.

Karakteristik perpindahan masa akibat variasi ini menjadi aspek yang utama dalam bahasan ke depan. Dengan memperhatikan hal tersebut maka akan dapat diperoleh perbandingan yang paling tepat untuk menjadi pelarut dalam proses absorpsi ini.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini menguji bagaimana pengaruh variasi perbandingan komposisi amina (MEA/DEA) pada pelarut terhadap koefisien perpindahan massa dan jumlah penyerapan pada proses absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis efektivitas pelarut campuran amina dalam menyerap gas CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga serta menentukan komposisi yang terbaik. Senyawa amina yang akan digunakan dalam studi ini adalah MEA dan DEA. Efektivitas absorpsi CO₂ akan diteliti dari aspek variasi perbandingan komposisi amina.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Menggunakan kontaktor membran serat berlubang yang terbuat dari PVC diameter tetap.
2. Menggunakan *feed gas* berupa gas dengan komposisi CO₂ murni.
3. Pelarut merupakan campuran senyawa MEA dan DEA dalam aquades.
4. Variabel yang ingin diketahui pengaruhnya terhadap penyerapan CO₂ adalah komposisi amina dan jumlah serat membran
5. Jumlah CO₂ terserap dalam pelarut dihitung berdasarkan sesilih tingkat keasaman (pH).

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam skripsi ini dilakukan dengan membagi tulisan menjadi lima bagian, yaitu :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang penjelasan mengenai latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori tentang prinsip dasar absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga. Dalam materi tersebut akan dibahas tentang bahan dasar membran, karakteristik CO₂, teknologi absorpsi yang sering digunakan, hingga perpindahan massa serta hidrodinamika dari proses absorpsi menggunakan kontaktor membran serat berongga. Selain itu, bab ini akan dilengkapi dengan karakteristik pelarut yang dapat digunakan hingga mengerucut pada campuran amina yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu MEA dan DEA.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang diagram alir penelitian, bahan dan peralatan yang digunakan dalam penelitian, serta prosedur penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

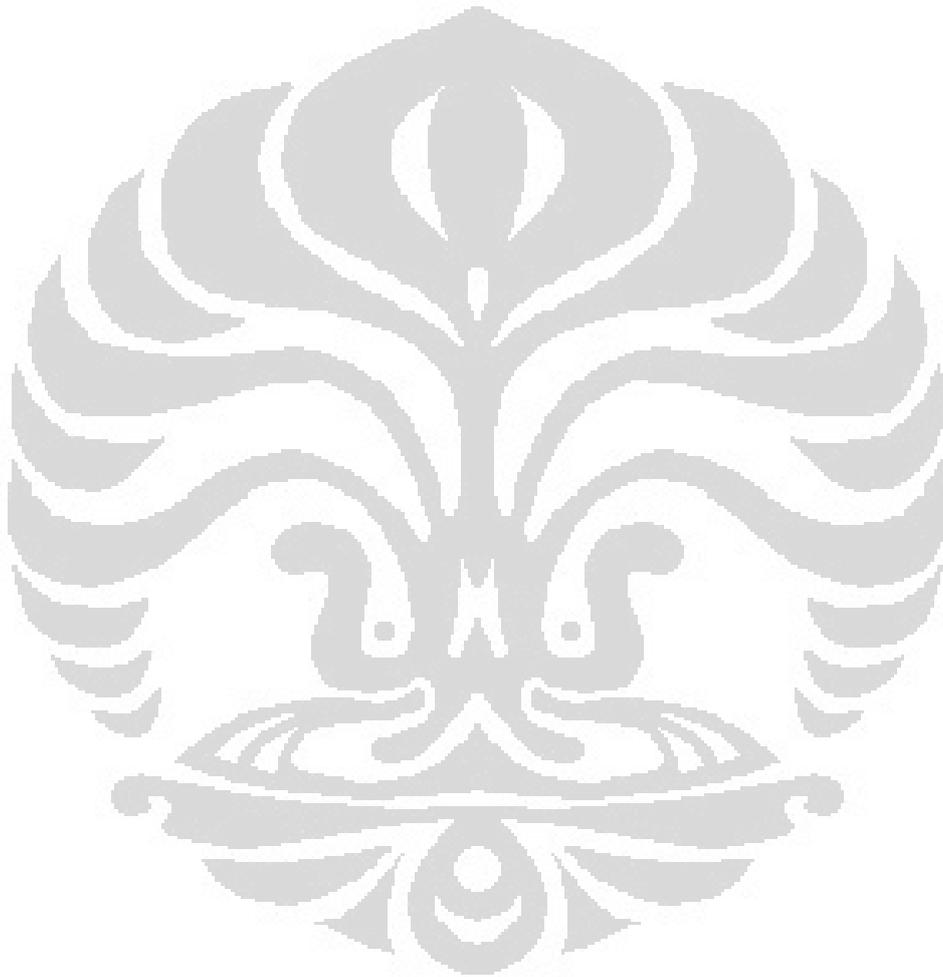
Bab ini berisi tentang penjelasan mengenai data dan hasil yang telah diperoleh dari seluruh tahapan penelitian, serta pembahasan mengenai analisis data yang telah dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang penjelasan mengenai kesimpulan yang dapat ditarik berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, dan saran yang dapat diberikan untuk menunjang penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 CO₂ dalam Gas Alam

2.1.1 CO₂ (Karbon Dioksida)

Karbon dioksida ialah senyawa kimia yang terbentuk dari 2 atom oksigen dan satu atom karbon. Karbon dioksida tidak berwarna, dan pada konsentrasi rendah tidak berbau. Karbon dioksida bersifat asam ketika bereaksi dengan air dengan reaksi :



Karbon dioksida berubah fasa menjadi padat pada suhu $-78,51^\circ \text{C}$ atau $-109,3^\circ \text{F}$ pada tekanan atmosfer. Densitas CO₂ pada keadaan standar ialah 1.98 kg/m³. Karbon dioksida juga bersifat toksik pada konsentrasi yang tinggi. Efek yang ditimbulkan oleh CO₂ ialah sebagai berikut :

- a. Konsentrasi 1% CO₂ dapat menyebabkan terpaparnya CO₂ dalam paru-paru
- b. Konsentrasi 2% CO₂ menyebabkan tekanan darah naik, detak jantung tidak teratur, dan mengurangi efektifitas pendengaran.
- c. Konsentrasi 5% CO₂ menyebabkan gangguan pernafasan, pusing, sakit kepala, efek panik, sulit untuk bernafas.
- d. Konsentrasi 8% CO₂ dapat menyebabkan sakit kepala berat, tremor, hilang kesadaran, penglihatan kabur, dan berkeringat.

2.1.2 Pemanfaatan CO₂

Selain sebagai pengotor/pencemar, CO₂ juga memiliki manfaat yang luas seperti :

- a. Makanan dan Minuman
- b. Sistem pneumatik
- c. Pemadam api
- d. Pengelasan
- e. Proses kimia dan farmasi
- f. Aplikasi laser

- g. EOR (Enhanced Oil Recovery)
- h. Refrigerasi

Sehingga CO₂ juga merupakan komoditas yang potensial untuk diambil (*recovery*) dari gas alam.

2.1.3 Keberadaan CO₂ dalam Gas Alam

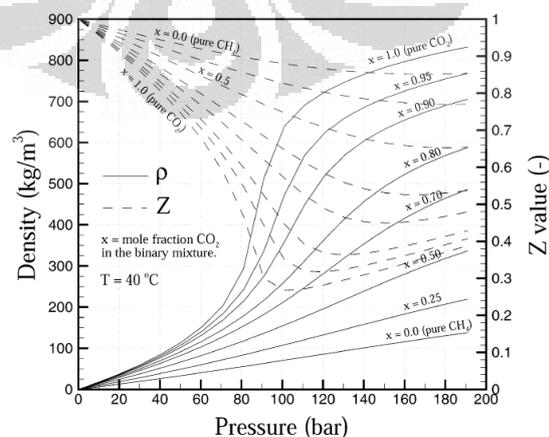
Pada umumnya CO₂ dan H₂S menjadi pengotor utama dalam gas alam. Dalam kasus sumur gas di Indonesia, jumlah kandungan CO₂ dalam gas alam tergolong sangat tinggi, sebaliknya H₂S rendah. Contoh komposisi CO₂ dalam gas alam ialah sebagai berikut :

Tabel 2.1 Komposisi Gas Conoco Phillips untuk Sumur Dayung dan Sumpal

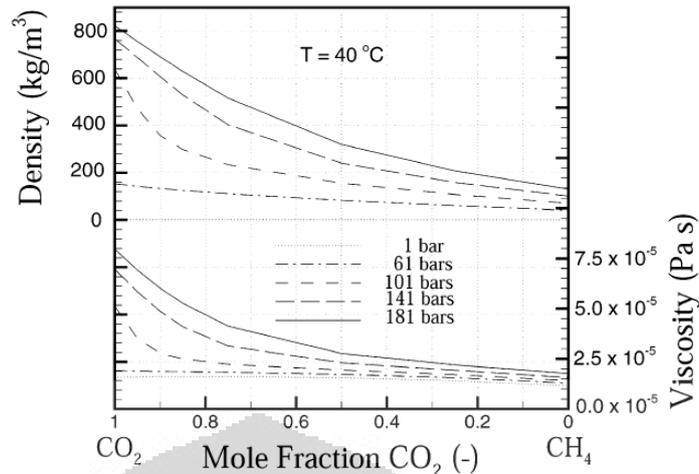
Komponen	Konsentrasi	
	Sumur Dayung*	Sumur Sumpal*
CO ₂	29,96 %	35,66 %
H ₂ S	100 ppm	60 ppm
N ₂	0,51 %	0,15 %
C ₁	66,8 %	62,06 %
C ₂	0,81 %	0,15 %
C ₃	0,06 %	0,02 %
C ₄₊	0,06 %	0,00 %
H ₂ O	1,80 %	1,80 %

(Sumber : Conoco Phillips Indonesia, Grissik)

Sifat fisika yang terbentuk antara CH₄ dengan CO₂ sebagai berikut :



Gambar 2.1 Densitas dan harga Z dari CO₂ – CH₄ pada suhu 40° C



Gambar 2.2 Densitas dan viskositas dari CO₂ – CH₄ pada suhu 40° C

2.1.4 Efek Negatif CO₂ dalam Gas Alam

Keberadaan CO₂ dalam gas alam akan menimbulkan kerugian jika tidak dihilangkan. Kerugian ini mencakup kerusakan alat yang ditimbulkan, hingga penurunan kualitas prosuk gas alam. Beberapa kerugian yang ditimbulkan CO₂ antara lain :

- Bersifat asam jika ada kadungan air, membentuk H₂CO₃ yang dapat memicu korosi pada utilitas pabrik, seperti lengan pipa, pendingin, dan injektor turbin.
- Pada suhu rendah dapat berubah menjadi padat (*icing*), sehingga menyumbat perpipaan dan merusak *main heat exchanger* (Dortmundt 1999)
- CO₂ bersifat inert, sehingga menurunkan nilai kalori pembakaran gas alam.
- Mengganggu proses gas alam menjadi LNG dan CNG.

Sehingga dari penjelasan di atas, dapat diambil kesimpulan bahwa CO₂ haruslah diambil dari gas alam karena dapat menimbulkan berbagai kerugian dan di sisi lain dapat dimanfaatkan untk berbagai keperluan.

2.2 Teknologi Pemisahan CO₂ dari Gas Alam

2.2.1 Pemisahan CO₂ Menggunakan Membran

Pemisahan CO₂ menggunakan membran ialah dengan prinsip perbedaan permeabilitas antara CO₂ dengan CH₄. Permeabilitas atau kemampuan realtif senyawa melewati membran, secara khusus untuk komposisi gas alam diilustrasikan oleh gambar berikut :



Gambar 2.3 Perbandingan permeabilitas senyawa-senyawa dalam gas alam

Sehingga, jika gas alam dilewatkan melalui membran, maka CO₂ akan lebih cepat lolos melewati membran dan gas alam yang bersih akan keluar sebagai produk. Namun teknologi ini mempunyai beberapa kelemahan, yaitu selektivitasnya yang buruk dan penurunan tekanan yang sangat besar. Selektivitas dari membran yang buruk menyebabkan banyak hidrokarbon yang hilang ikut terlewatkan bersama-sama dengan CO₂. Hal ini tentunya menyebabkan kerugian yang relatif besar.

2.2.2 Pemisahan CO₂ dengan Metode Adsorpsi

Pemisahan dengan adsorpsi menggunakan prinsip penyerapan CO₂ pada permukaan adsorben melibatkan reaksi kimia. Adsorben yang sering digunakan dalam prose ini ialah :

- a. Iron Sponge
- b. Zinc Oxide
- c. Molecular Sieve

Kelebihan dari metode ini ialah cukup baik dalam menangkap gas H₂S, namun kurang baik dalam adsorpsi CO₂, karena efektivitasnya yang buruk. Selain itu, regenerasi dari adsorben ini relatif sulit dan membutuhkan suhu yang tinggi.

2.2.3 Pemisahan CO₂ dengan Distilasi Kriogenik

Distilasi kriogenik ialah distilasi pada suhu yang sangat rendah, mencapai -180°C. Proses distilasi kriogenik ini terdiri dari dua, tiga atau empat kolom fraksinasi, di mana kolom pertama beroperasi pada tekanan 3100-4500 kPa dan kolom kedua beroperasi pada tekanan sedikit lebih rendah. Distilasi kriogenik ini membutuhkan persiapan awal *feed* yang rumit, instalasi unit ini sangat mahal, dan kompresi yang dibutuhkan menyebabkan operasi kompresor besar yang berbiaya tinggi. Sehingga secara ekonomi, jika tidak dalam keadaan mendesak, pilihan distilasi kriogenik ini relatif tidak diminati

2.2.4 Pemisahan CO₂ dengan Teknologi Absorpsi

Pemisahan CO₂ dengan absorpsi ialah metode yang paling sering dijumpai. Absorpsi lebih disukai dalam industri pengolahan gas dibanding teknologi lain karena efektivitas yang tinggi, kualitas produk yang baik, dan relatif mudah serta murah jika melihat efektivitasnya. Teknologi absorpsi prinsipnya ialah melarutkan CO₂ dalam pelarut yang sesuai. Perbedaan kelarutan antara hidrokarbon dan CO₂ dalam absorben menyebabkan produk keluaran akan bersih dari CO₂. Untuk dapat mengabsorb CO₂, maka absorben (pelarut) dan *sour gas* haruslah dikontakkan. Ada beberapa cara dalam mengontakkan CO₂ dengan pelarut, diantaranya ialah dengan kontaktor kolom dan kontaktor membran.

Kontaktor kolom berbentuk seperti kolom tinggi yang di dalamnya berisi media pengontak seperti tray atau packing. Kolom absorber biasanya berisi tray dan kolom regenerasi pelarut menggunakan packing. *Sour gas* akan masuk dari bagian bawah kolom absorber dan solven dimasukkan dari atas, sehingga terjadi kontak secara *countercurrent* dan CO₂ akan larut dalam absorben (biasanya senyawa alko-amina).

Namun kontaktor kolom ini memiliki berbagai kekurangan, seperti terbentuknya *flooding*, *loading*, *foaming*, dan *channeling*. Hal ini menyebabkan absorpsi tidak efisien dan laju perpindahan masa kurang baik. Hal ini memicu ilmu pengetahuan untuk menemukan lagi kontaktor yang lebih baik dan efektif untuk menyelesaikan masalah di atas.

Sebuah teknologi baru berupa penggabungan antara teknologi membran dan absorpsi ialah kontaktor membran serat berongga. Kontaktor ini berbentuk seperti fiber dengan shell dan tube. Solven dan gas alam akan dikontakkan melalui lapisan membran dengan diameter porositas tertentu. Perbedaan permeabilitas komposisi gas alam juga akan mempengaruhi absorpsi.

Absorpsi CO₂ dengan menggunakan membran serat berongga ini memiliki kelebihan yaitu tidak mencemari lingkungan, hemat energi, dan tidak boros dalam pemakaian pelarut, biaya operasi rendah. Metode ini juga aplikatif dan dapat menghindari permasalahan dalam kontaktor kolom di atas (*channeling, flooding, loading, foaming*). Namun perlu diteliti lagi mengenai kondisi proses yang paling optimum untuk proses absorpsi menggunakan membran serat berongga ini, seperti pelarut, suhu, tekanan, laju alir, bahan membran, dan lain-lain.

2.3 Absorpsi CO₂ Menggunakan Kontaktor Membran Serat Berongga

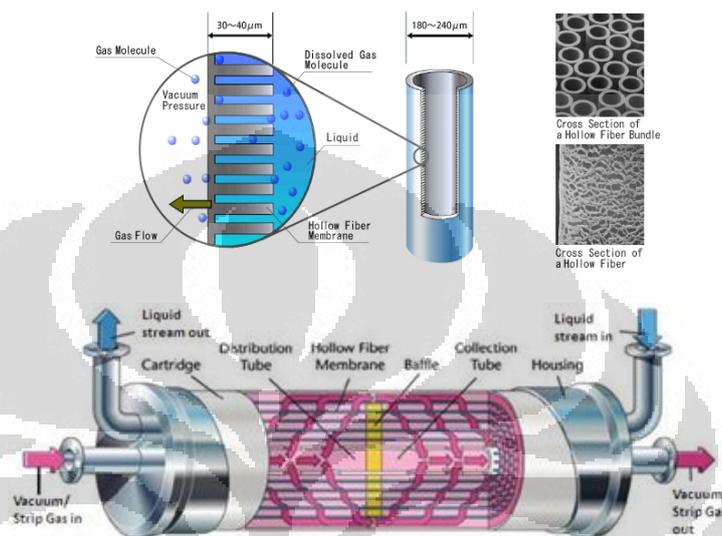
2.3.1 Membran

Membran ialah suatu penghalang selektif di antara dua fasa sehingga molekul tertentu dapat menembusnya sedangkan molekul lain tidak. Hal ini dikarenakan perbedaan ukuran pori membran dan molekul tersebut ataupun karena sifat dari membran (permeabilitas, selektivitas). Proses membran bersifat selektif dan mengontrol perpindahan massa dari suatu molekul dalam fasa bulk ke fasa bulk lain yang terpisahkan oleh membran. Laju perpindahan molekul pada membran ditentukan oleh permeabilitasnya di dalam membran dan juga oleh gaya penggerakannya (*driving force*). Gaya penggerak tersebut dapat berupa perbedaan tekanan, konsentrasi, temperatur antara dua fluida, maupun perbedaan potensial listrik.

2.3.2 Kontaktor membran serat berongga

Penggunaan kontaktor membran serat berongga merupakan proses membran yang relatif baru. Kontaktor membran serat berongga, yang memiliki struktur seperti Gambar 2.4, 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

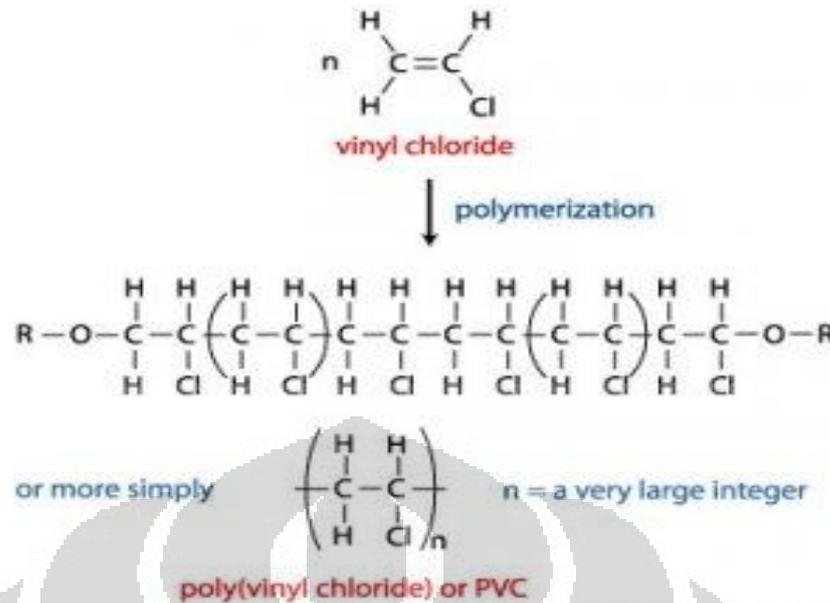
dimensinya. Struktur serat di dalam modul yang asimetrik memiliki diameter dalam sekitar 42 mikron (0,0016 inci) dan diameter luar sekitar 85 mikron (0,0033 inci). Jutaan serat ini akan dibentuk menjadi bundel dan dilipat setengah dengan konfigurasi kerapatan pengepakan yang paling tinggi mencapai $30000 \text{ m}^2/\text{m}^3$.



Gambar 2.4 Kontaktor Membran Serat Berongga

Pada umumnya membran yang digunakan dalam proses industri dapat dibagi menjadi dua jenis bahan, yaitu membran biologis dan membran sintetik. Membran biologis merupakan membran yang penting bagi kehidupan karena setiap sel hidup pasti memiliki membran di dalamnya, sedangkan membran sintetik merupakan membran yang terbuat baik dari bahan organik maupun bahan anorganik.

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 absorbent senyawa amina pada proses absorpsi. Gambar 2.5 berikut menggambarkan struktur dari monomer dan polimer PVC.

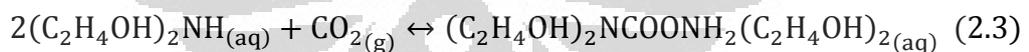
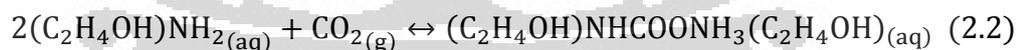


Gambar 2.5 Struktur kimia membran PVC

2.3.3 Kontakor membran serat berongga untuk absorpsi CO₂ dari gas alam

Absorpsi CO₂ dengan kontakor membran serat berongga mulai dikembangkan pada sekitar tahun 1980. Pada awal penggunaannya, prosesnya lambat dan terbatas pada aliran yang kecil, terutama karena adanya resiko ekonomi yang dihadapi dalam perlakuan terhadap aliran besar, tetapi juga karena banyak parameter design proses yang belum dikteahui.

Proses absorpsi CO₂ dengan pelarut amina berlangsung secara kimiawi dengan persamaan reaksi sebagai berikut :



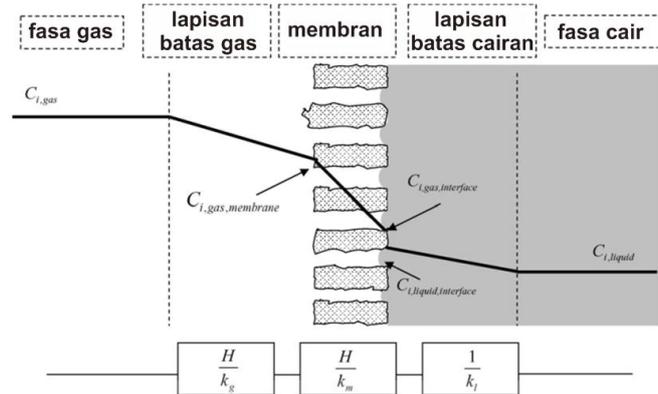
Reaksi antara amina yang berfasa cair dengan CO₂ yang berfasa gas menyebabkan reaksi ini termasuk reaksi heterogenous. Akibat perbedaan fasa ini, kedua senyawa akan sulit untuk berkontak sehingga reaksi yang terjadi tidak sebanyak yang diharapkan. Untuk itulah diperlukan suatu kontakor yang akan meningkatkan kontak antara pelarut dan gas, dalam hal ini adalah membran serat berongga. Namun konsekuensinya adalah timbulnya penghalang yang menimbulkan tahanan yang cukup signifikan. Tahanan ini diakibatkan adanya lapisan film fasa cair, lapisan film fasa gas, serta membran itu sendiri.

Adanya penghalang ini, menyebabkan CO₂ harus berdifusi terlebih dahulu ke dalam ketiga lapisan tersebut sebelum akhirnya dapat bereaksi dengan pelarut. Dengan kata lain, terjadi dua peristiwa penting dalam sistem absorpsi CO₂ melalui membran, yaitu peristiwa fisik yang merupakan perpindahan massa CO₂ dengan difusi dan peristiwa kimia yaitu reaksi antara pelarut dan CO₂. Reaksi antara pelarut dan CO₂ terjadi dalam waktu yang sangat cepat terutama untuk amina primer dan sekunder. Sebaliknya tahanan yang sangat besar membuat peristiwa fisik terjadi cenderung lebih lambat. Hal ini menyebabkan proses difusi CO₂ mengontrol banyaknya CO₂ yang dapat berkontak dengan pelarut (*diffusion-controlled chemical reaction*). Oleh karena itu, pembahasan mengenai proses absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga ini lebih diutamakan pada peristiwa fisik.

Absorpsi CO₂ dengan menggunakan membran didasarkan atas terjadinya kontak gas-cair melalui membran mikroporous yang hidrofobik. Membran ini membentuk penghalang yang *permeable* antara fasa gas dan fasa cair sehingga perpindahan massa tidak disertai dengan dispersi antara satu fasa dengan fasa yang lainnya. Dinding dari membran hidrofobik berfungsi untuk memisahkan fasa gas dan fasa cair namun komponen gas akan berdifusi melalui pori membran dan terabsorpsi ke dalam fasa cair. Perpindahan masa pada proses absorpsi CO₂ ini dipengaruhi oleh :

1. Difusi CO₂ dari fasa gas ke permukaan membran
2. Difusi CO₂ melewati pori membran ke permukaan cairan.
3. Pelarutan CO₂ ke dalam absorben diikuti difusi ataupun reaksi kimia.

Hal ini dapat diilustrasikan oleh gambar berikut :



Gambar 2.6. Studi Perpindahan Massa Kontaktor Membran

Dari gambar di atas dapat diamati bahwa terdapat 3 tahanan dari perpindahan masa CO_2 melalui membran, Jumlah ketiga tahanan ini merupakan tahanan keseluruhan untuk perpindahan gas di dalam sistem kontaktor membran yang berhubungan dengan koefisien perpindahan masa seperti yang tertulis di bawah ini :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{H K_G} + \frac{1}{H K_m} + \frac{1}{K_L} \quad (2.4)$$

- K : koefisien perpindahan masa total
- H : bilangan Henry
- K_m : koefisien perpindahan masa melewati membran
- K_L : koefisien perpindahan massa fasa cair

Beberapa studi yang telah dilakukan oleh peneliti, yang membran berukuran mikro hidrofobik untuk pemisahan atau penyerapan gas dari atau ke dalam air melalui kontaktor membran, menunjukkan bahwa kinerja perpindahan massanya dikendalikan oleh tahanan perpindahan massa yang ada di fasa cair dan gas. Gas ditransfer melalui dinding serat berongga yang berpori melalui difusi gas dikarenakan pori-pori membran kering dan terisi oleh gas. Dengan demikian gas berpindah dengan cara mengalir melalui dinding serat membran dan bukannya melalui proses pelarutan di dalam membran. Perpindahan gas melalui membran dengan cara difusi fasa gas akan lebih besar dibandingkan difusi melalui fasa cair, dengan demikian konsentrasi lapisan batas dapat diabaikan. Karena membran yang digunakan ialah hidrofobik, maka pori-pori membran akan terisi gas,

sehingga tahanan membran untuk perpindahan gas juga dapat diabaikan. Sehingga persamaan (2.1) dapat disederhanakan menjadi :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_L} \quad (2.5)$$

Prinsip 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 :

$$K_L = \frac{Q_L}{A_m} \ln \frac{C^* - C_0}{C^* - C_1} \quad (2.6)$$

dengan :

- K_L : koefisien perpindahan massa
- Q_L : laju alir volumetrik air
- A_m : luas kontak perpindahan masa
- C^* : kelarutan CO_2 dalam pelarut
- C_0 : konsentrasi gas CO_2 sebelum melewati modul
- C_1 : 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 dalam persamaan berikut :

$$S_h = a R_e^b S_c^c \quad (2.7)$$

dengan S_h adalah bilangan Sherwood, R_e adalah bilangan Reynold, dan S_c ialah bilangan Schmidt. Berikut ialah persamaan untuk menghitung bilangan-bilangan tersebut :

$$S_h = k \frac{d_e}{D} \quad (2.8)$$

$$R_e = \frac{\rho v d_e}{\mu} \quad (2.9)$$

$$S_c = \frac{v}{D} \quad (2.10)$$

untuk mendapatkan nilai d_e perlu diperhatikan faktor kekosongan seperti berikut :

$$\varepsilon = 1 - n_{\text{fiber}} \left(\frac{d_{0, \text{fiber}}}{D_{i, \text{modul}}} \right) \quad (2.11)$$

$$d_e = \frac{d_{0, \text{fiber}}}{\sqrt{1 - \varepsilon}} \quad (2.12)$$

Aspek hidrodinamika juga penting untuk dibahas, karena faktor-faktor seperti friksi dan *pressure drop* juga akan mempengaruhi efektivitas perpindahan massa gas. Persamaan friksi yang digunakan ialah :

$$f = \frac{\varepsilon(D_0^2 - D_i^2)\Delta P}{4d_0L_f \frac{1}{2}\rho v^2} = \frac{d_e\Delta P}{2L_f\rho v^2} \quad (2.13)$$

2.3.4 Absorpsi CO₂ dari gas alam melalui kontakor membran serat berongga dengan pelarut campuran MEA/DEA

Pemilihan larutan penyerap pada penelitian ini didasarkan pada pertimbangan syarat-syarat yang harus dimiliki oleh suatu pelarut (Treybal 1981):

- a. Kelarutan gas yang tinggi
- b. Pelarut memiliki tekanan uap yang rendah
- c. Tidak korosif
- d. Harga pelarut yang murah dan mudah didapatkan
- e. Viskositas yang rendah
- f. Sebaiknya tidak beracun
- g. tidak mudah terbakar, dan
- h. stabil

Senyawa amina adalah pelarut yang paling banyak digunakan pada proses absorpsi CO₂ sebagai absorben, karena senyawa amina dapat bereaksi dengan CO₂ membentuk senyawa kompleks (ion karbamat) dengan ikatan kimia yang lemah (Wang 2003). Ikatan kimia ini dapat dengan mudah terputus dengan pemanasan (*mild heating*), sehingga regenerasi absorben (senyawa amina) dapat dengan mudah terjadi (Wang 2003). Sehingga dapat dikatakan bahwa senyawa amina adalah pelarut yang efisien pada proses operasional absorpsi CO₂.

Senyawa amina yang paling sering digunakan sebagai absorben pada absorpsi CO₂ adalah MEA (monoethanolamine), DEA (diethanolamine), dan MDEA (methyldiethanolamine), ketiga senyawa amina tersebut memiliki kemampuan menyerap CO₂ yang baik, laju absorpsi yang cepat, dan mudah untuk

diregenerasi (Astarita 1983, Barth 1984, Yu 1985). Berikut adalah perbandingan dari ketiga senyawa amina tersebut (Kim 2000, Jian-gang 2009, Wang 2003) :

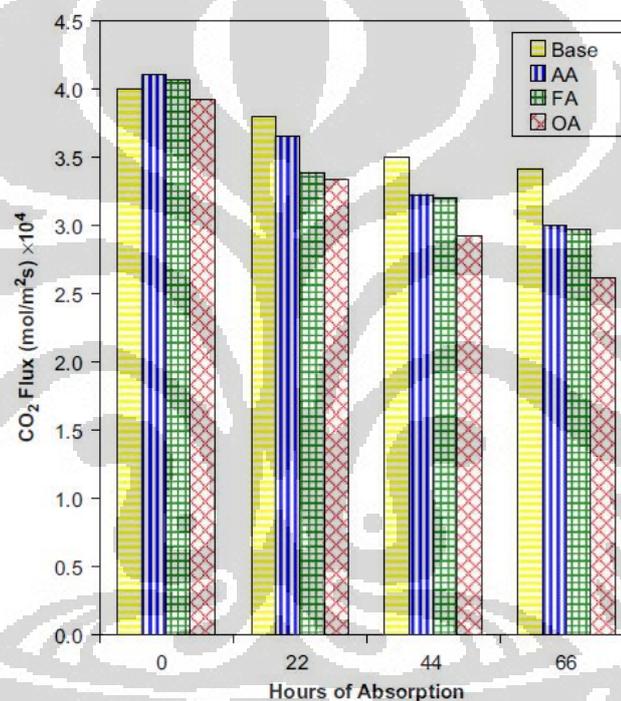
Tabel 2.2 Perbandingan sifat / karakteristik MEA, DEA, dan MDEA

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 karena paling basa, namun korosif	Merupakan senyawa yang moderat dan tidak terlalu korosif	Tidak korosif
3	Memiliki tekanan uap yang paling tinggi, sulit diregenerasi	Memiliki tekanan uap yang cukup rendah	Mudah diregenerasi

Dari berbagai penelitian yang telah dilakukan diketahui bahwa pelarut campuran lebih baik dari pada pelarut amina tunggal (Jian-gang 2009). Penelitian serupa juga dilakukan dan disimpulkan bahwa CO₂ yang diserap akan semakin banyak dengan pencampuran absorben piperazine dan absorben 2-amino-2-methyl-1-propanol dibandingkan jika absorben tersebut digunakan tanpa melalui pencampuran (Lin 2009). Hasil penelitian tersebut di atas menunjukkan bahwa pelarut campuran senyawa amina lebih baik dalam mengabsorpsi gas CO₂ dari pada pelarut amina tunggal.

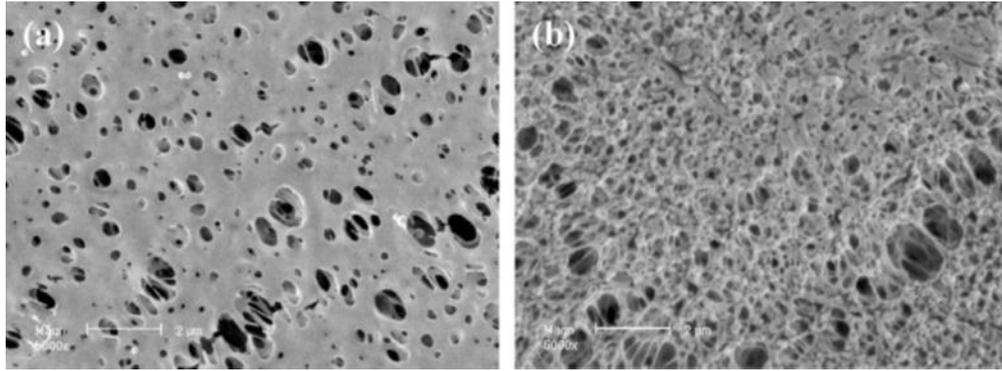
Pelarut MDEA diketahui menjadi senyawa yang paling lemah dalam mengikat CO₂. Faktor resistansi yang besar dalam proses absorpsi melalui kontaktor membran memperlemah daya absorpsi dari MDEA. Nilai koefisien perpindahan massa yang kecil menjadikan pelarut ini kurang disukai untuk digunakan dalam proses absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran. Sebaliknya MEA dan DEA mempunyai daya penyerapan yang baik. Sehingga pada penelitian ini digunakan campuran kedua pelarut dengan harapan dapat meningkatkan daya absorpsi. Selain karena pelarut campuran terbukti lebih baik dibanding pelarut tunggal, tujuan pencampuran MEA dan DEA dalam penelitian ini juga didasarkan pada adanya batasan konsentrasi MEA di mana untuk konsentrasi MEA yang lebih tinggi justru akan menurunkan daya absorpsi pelarut (Kim 2000).

Komposisi total amina (MEA+DEA) yang digunakan dalam penelitian adalah 10% berat. Hal ini berdasarkan pada keterbatasan konsentrasi efektif amina untuk proses absorpsi CO₂ melalui membran serat berongga. Konsentrasi amina (MEA dan DEA) yang tinggi dapat menyebabkan kerusakan membran yang membuat kontak gas-cair menjadi kurang efektif. Konsentrasi MEA sebanyak 20 % berat diketahui dapat menyebabkan penurunan efektivitas membran pada penggunaan dalam rentang waktu tertentu (Franco 2009). Berikut adalah grafik yang menunjukkan penurunan kemampuan kontak gas-cair dari membran akibat MEA 20% berat.



Gambar 2.7 Perubahan fluks CO₂ akibat degradasi membran oleh MEA.

Base : larutan MEA 20 % berat, *FA* : larutan MEA 20% berat dengan 100 ppm asam format, *AA* : larutan MEA 20% berat dengan 100 ppm asam asetat, dan *OA* : larutan MEA 20% berat dengan 1000 ppm asam oxalic. (Franco 2009)



Gambar 2.8 Pengecilan porositas membran sebelum terkontak amina (a) dan setelah terkontak dengan amina konsentrasi 20% berat (b) (Franco 2009)

Dari gambar 2.8 terlihat perubahan morfologi membran sebelum dan setelah terkontak dengan amina selama 25 jam. Amina merusak performa membran dengan memperbesar diameter dari sebagian pori-pori dan mengacaukan porositasnya. Di samping memperbesar sebagian pori-pori membran, amina juga memperbesar distribusi pori sehingga diameternya menjadi sangat kecil dan akhirnya menurunkan difusivitas gas ke dalam membran. Akibatnya, pori-pori yang besar berpotensi besar untuk terjadinya pembasahan sementara porositas yang menurun memperburuk kontak antara fasa gas dan fasa cair.

Faktor pembasahan membran (*pore wetting*) menjadi faktor yang sangat berpengaruh dalam proses absorpsi dengan kontakor membran. Pembasahan membran (fasa cair memasuki pori-pori membran) dapat menaikkan tahanan membran dengan sangat signifikan, menyebabkan penurunan drastis dari perpindahan massa CO_2 ke dalam pelarut. Pelarut organik, termasuk senyawa amina, mempunyai kecenderungan yang lebih dalam mendorong terjadinya pembasahan membran ini. Diketahui untuk DEA pada konsentrasi 20% berat dapat menyebabkan pembasahan membran bahkan pada membran yang sangat hidrofobik seperti polipropilen (Lihong Bao 2005). Dari kedua alasan di atas, disimpulkan bahwa konsentrasi amina yang aman untuk digunakan dalam percobaan ini adalah kurang dari 20% berat, dalam hal ini dipilih konsentrasi total untuk MEA dan DEA sebesar 10% berat.

2.3.5 Posisi penelitian (State of the Art)

Dari penjelasan-penjelasan di atas, diperoleh suatu kesimpulan bahwa penelitian ini sebenarnya ialah lanjutan dari penelitian-penelitian lain secara berkesinambungan. Penelitian mengenai absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga dengan pelarut campuran juga bukanlah penelitian yang pertama. Posisi penelitian ini dalam berbagai penelitian yang telah dilakukan mengenai absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga kurang lebih dapat digambarkan melalui tabel State of the Art berikut :

Tabel 2.3 State of the Art

Pelarut	Campuran	amine	MEA/DEA				Penelitian ini
			MEA/MDEA	Gong 2006			Gong 2006
			MDEA/DEA				
		amine with non amine	Lu 2006 Jian-gang 2009			Jian-gang 2009	
		non amine		Lu 2009		Lu 2009 JunYue 2007	
	tunggal	amine	Rangwala 1995 Bottino 2007 deMontigny 2005 Kumara 2002 Khaisri 2009	Keshavarz 2007 Yan 2007	Faiz 2010	Kim 2000 Wang 2004	
			non amine	Rangwala 1995	Yan 2007	Dindore 2003	Lin 2008
			laju alir pelarut	laju alir gas	tekanan	konsentrasi/ komposisi pelarut	
	variabel						

Penelitian mengenai absorpsi CO₂ menggunakan membran serat berongga sebagai kontaktor dimulai pada tahun 1995 (Rangwala 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 (Bottino 2007, deMontigny 2005, Kumara 2002, dan Khaisri 2009). Namun peneliti-peneliti di atas umumnya hanya memperhatikan pengaruh dari laju alir pelarut pada koefisien perpindahan massa. Maka pada tahun 2007 mulai diteliti bagaimana pengaruh variabel lain seperti laju alir gas pada aspek perpindahan massa (Keshavarz 2007, Yan 2007).

Kemudian peneliti-peneliti mulai mengkombinasikan 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, atau campuran pelarut yang tidak mengandung amina. Berbagai penelitian sudah dilakukan misalnya dengan pelarut campuran single amino-acid salt, glycin salt (GLY), dan piperazine (Lu 2009). Kemudian penelitian lain menggunakan pencampuran amina dengan senyawa lain, yaitu glycine salt (GLY) and MEA (Jiang 2009). Setelah itu terdapat pula penelitian yang menggunakan campuran senyawa amina, yaitu MEA dengan MDEA sebagai pelarut (Gong 2006).

Posisi penelitian ini sendiri ialah meneliti kemampuan campuran 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 dan teknologi di bidang absorpsi CO₂ dengan kontaktor membran. Sehingga kontaktor membran dapat semakin efektif dan siap untuk menggantikan kontaktor kolom konvensional pada proses separasi CO₂ untuk keperluan yang luas, serta khususnya untuk pemurnian gas alam.

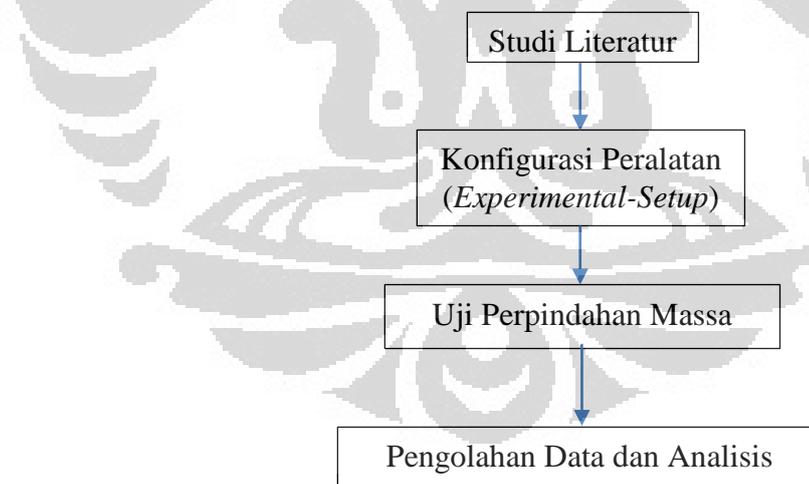
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Pendahuluan

Proses absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga dengan pelarut campuran MEA dan DEA ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas pelarutan absorben tersebut. Penelitian ini dilakukan dengan mempelajari perpindahan massa yang terjadi dan studi hidrodinamika. Penelitian dilakukan di Laboratorium Intensifikasi Proses Lantai 2, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

3.2 Rancangan Penelitian

Secara keseluruhan penelitian akan dilakukan dalam empat tahap utama yaitu studi literatur, konfigurasi peralatan (*Experimental Set-up*), uji perpindahan massa dan hidrodinamika, dan pengolahan data. Diagram alir penelitian ditunjukkan oleh gambar berikut :



Gambar 3.1. Alur Penelitian

3.2.1 Studi Literatur

Studi literatur menyangkut pengkajian teori-teori dan penelitian sebelumnya dengan tujuan menambah pengayaan ilmu mengenai penelitian terkait. Informasi mengenai karakteristik membran PVC, pelarut alkanamina,

serta studi perpindahan massa pada absorpsi CO₂ menjadi bahan utama yang akan dipelajari. Sumber literatur diutamakan pada jurnal-jurnal ilmiah dan buku pegangan, selanjutnya sumber-sumber lain seperti penelitian sebelumnya dan informasi dari internet akan melengkapi teori yang ada.

3.2.2 Konfigurasi Peralatan (Experimental Set-up)

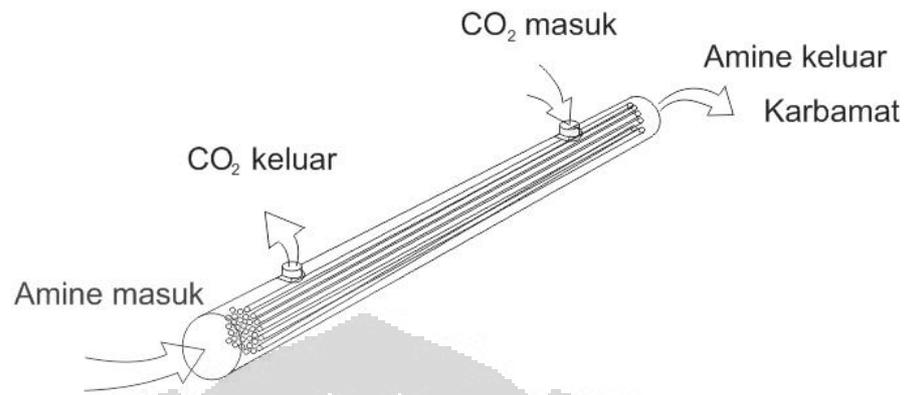
Alat yang digunakan dalam penelitian ini :

- a. Kontaktor membran serat berongga
- b. Tangki reservoir pelarut
- c. Pompa
- d. Needle valve, gas flow meter
- e. pH meter
- f. Liquid flow meter

Sementara bahan yang digunakan ialah :

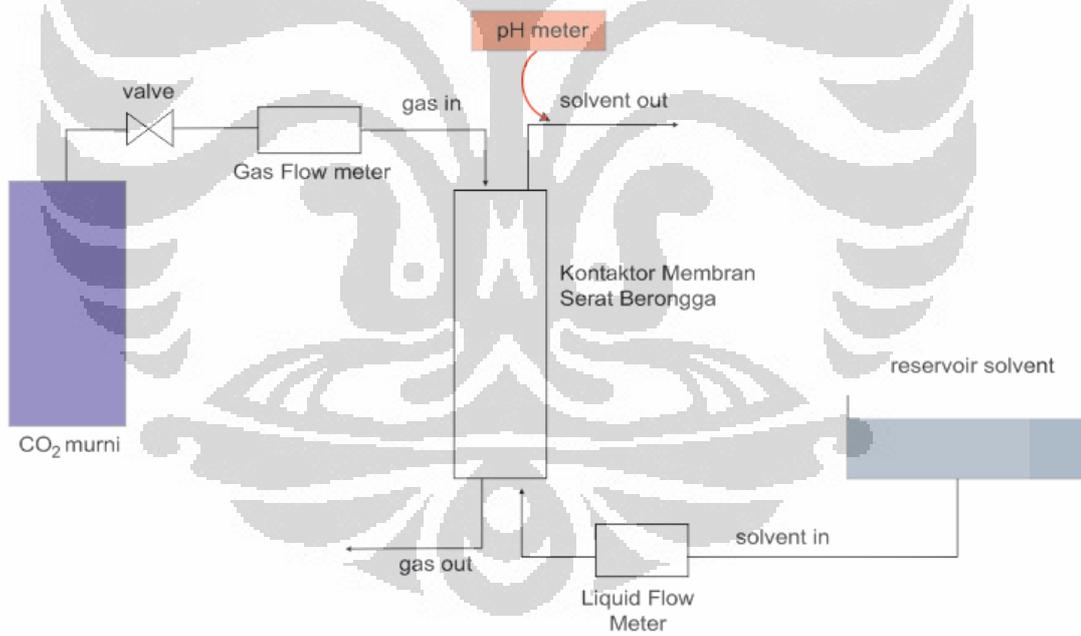
- a. Membran serta berongga PVC
- b. Pipa akrilik
- c. Pipa PVC
- d. Lem epoksi dan Araldite
- e. Gas CO₂ dengan kemurnian di atas 96%
- f. Larutan MEA dan DEA
- g. Air dengan pH netral

Skema modul :



Gambar 3.2 Skema modul membran

Skema alat percobaan :



Gambar 3.3 Skema Alat Penelitian

3.2.3 Uji Perpindahan Massa

Prosedur penelitian dilakukan melalui tahapan berikut :

1. Membuat modul membran dengan jumlah serat 20, 30, dan 40

2. Menyiapkan semua peralatan dan memilih salah satu modul dengan jumlah serat tertentu.
3. Menghubungkan peralatan berupa reservoir, pompa, flow meter, modul, dan tabung CO₂
4. Feed gas CO₂ yang digunakan merupakan gas CO₂ murni
5. Menyiapkan pelarut (air, MEA, dan DEA)
6. Mengalirkan gas CO₂ pada sisi *shell* dengan laju 900 cm³/menit tanpa variasi tekanan dan menunggu hingga keadaan stabil
7. Mengalirkan pelarut pada sisi *tube* dengan laju 300 mL/menit dan menunggu hingga keadaan stabil
8. Suhu yang digunakan suhu ruangan
9. Pengambilan data sampel berupa pH dari larutan serta suhunya.
10. Mengulangi prosedur untuk setiap variasi konsentrasi pelarut.

Variasi perbandingan komposisi MEA dan DEA adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1 Variasi Komposisi Amina

No	Konsentrasi (persen berat)		
	MEA*	DEA**	Air
1.	0	10	90
2.	2	8	90
3.	4	6	90
4.	6	4	90
5.	8	2	90
6.	10	0	90

* dan ** :

Berdasarkan batas konsentrasi amina yang tidak merusak membran (Franco 2009; Lihong Bao 2005)

11. Mengulangi langkah 1 sampai 10 untuk modul membran dengan jumlah serat 20, 30, dan 40.

3.2.4 Pengolahan Data

Data-data yang diambil dalam penelitian ini akan diolah untuk menentukan koefisien perpindahan massa antara pelarut MEA/DEA dengan gas CO₂ dan melihat korelasi perpindahan massa dari kontaktor membran serat berongga. Data yang diambil ialah laju alir, luas permukaan, diameter serat, dan konsentrasi CO₂ dalam pelarut sebelum dan sesudah melewati modul. Konsentrasi CO₂ dalam pelarut diukur tingkat keasaman (pH) dari pelarut.

Koefisien perpindahan massa

Koefisien perpindahan massa CO₂ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$K_L = \frac{Q_L}{A} \ln \frac{(C^* - C_0)}{C^* - C_1} \quad (3.1)$$

Dimana :

- K_L = koefisien perpindahan massa (m/s)
- Q_L = laju alir volumetric pelarut (mL/menit)
- A = luas kontak perpindahan massa (m²)
- C* = kelarutan CO₂ di dalam pelarut
- C₀ = konsentrasi gas CO₂ dalam pelarut sebelum melewati modul
- C₁ = konsentrasi gas CO₂ dalam pelarut setelah melewati modul

Korelasi Perpindahan Massa

Besaran yang digunakan bilangan Sherwood :

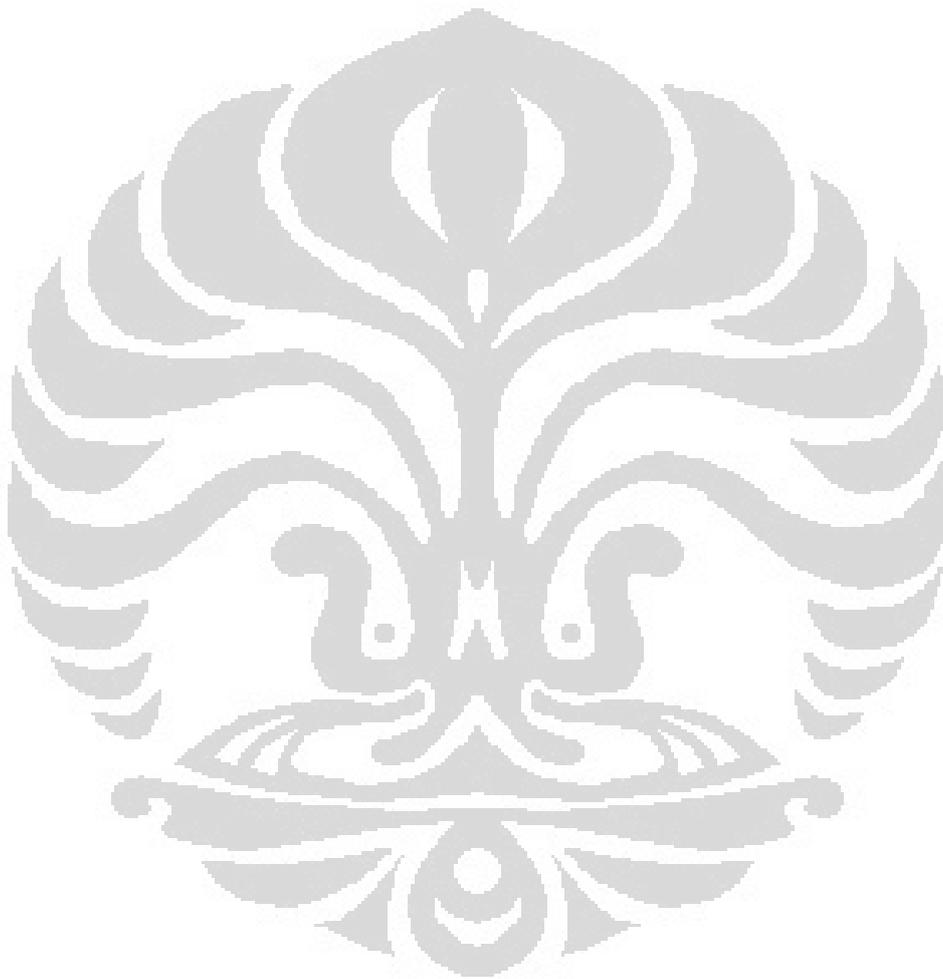
$$S_h = k_l \frac{d_e}{D} \quad (3.2)$$

dan bilangan Reynold :

$$Re = \frac{\rho v d_e}{\mu} \quad (3.3)$$

Dari perhitungan perpindahan massa, hasil penelitian ini dapat dianalisis mengacu pada teori dan penelitian sebelumnya. Data-data mengenai koefisien perpindahan massa, fluks CO₂, dan tingkat penyerapan CO₂ akan menjadi data yang penting

untuk dibandingkan, terutama terhadap nilai k_{La} dan *acid loading* dari kontaktor kolom konvensional. Sehingga diperoleh kesimpulan apakah pelarut campuran MEA/DEA lebih baik dari penelitian sebelumnya atau tidak.



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas dari campuran amina (MEA/DEA) sebagai pelarut dalam absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga. Dalam bahasan ke depan, variabel seperti koefisien perpindahan massa (k_L), kapasitas penyerapan (k_{LA}), fluks CO₂ (J), bilangan Sherwood (Sh), dan *acid loading* akan menjadi parameter-parameter performa sistem absorpsi membran ini. Variasi yang digunakan dalam studi penelitian ini adalah komposisi amina dan jumlah serat dari membran.

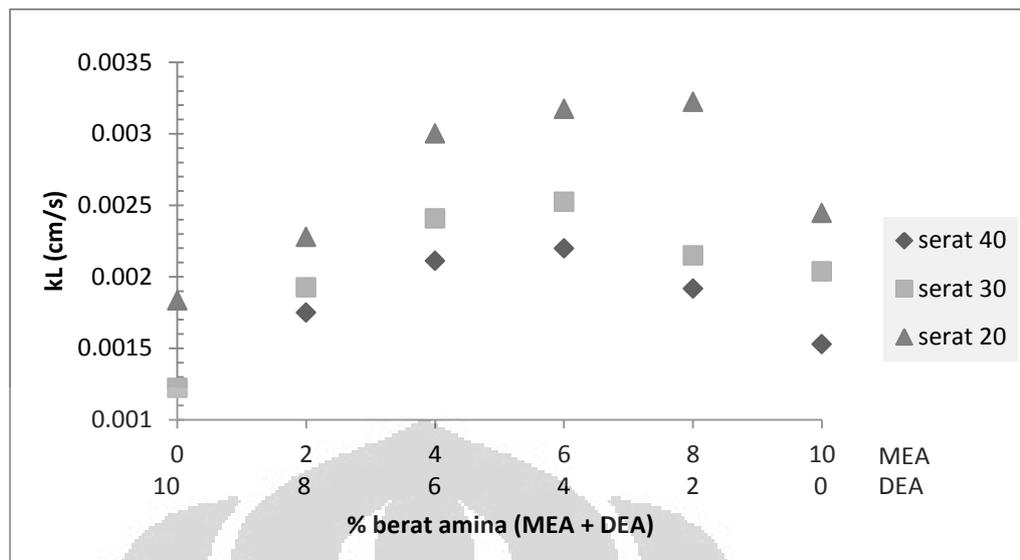
4.1 Pengaruh Komposisi Amina pada Perpindahan Massa

Variasi komposisi amina yang digunakan dalam percobaan ini adalah sebagai berikut :

Tabel 4.1 Variasi komposisi amina

No	Komposisi Amina (% berat)		
	MEA	DEA	Aquadest
1	0	10	90
2	2	8	90
3	4	6	90
4	6	4	90
5	8	2	90
6	10	0	90

Salah satu parameter penting dalam sistem absorpsi dengan kontaktor membran adalah koefisien perpindahan massa (k_L). Koefisien ini menggambarkan efektivitas dari sistem membran-pelarut untuk mengabsorpsi CO₂ per satuan luas membran. Semakin tinggi nilai koefisien ini, maka perpindahan massa CO₂ ke dalam membran per satuan luasnya akan semakin baik. Hasil percobaan untuk koefisien perpindahan massa (k_L) adalah sebagai berikut :



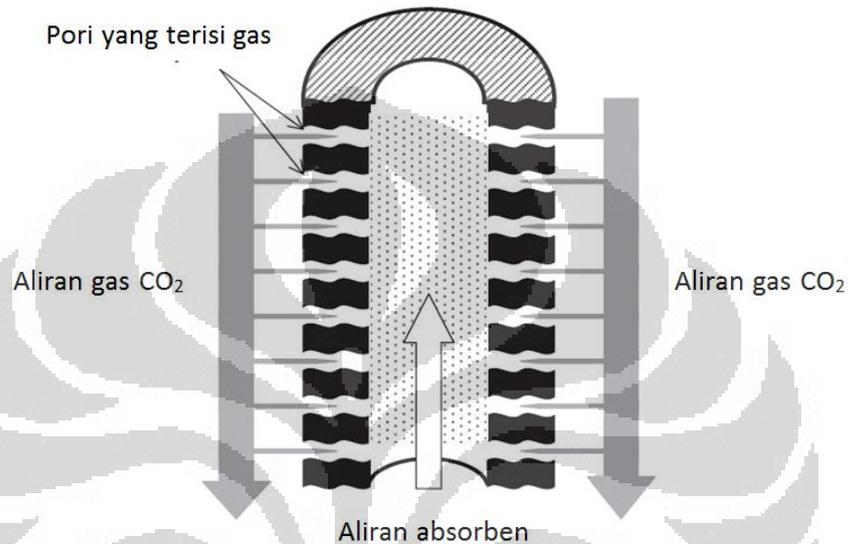
Gambar 4.1 Pengaruh komposisi amina terhadap koefisien perpindahan massa (k_L)

Dari grafik di atas terlihat koefisien perpindahan massa naik seiring dengan naiknya konsentrasi MEA. Hal ini dikarenakan senyawa MEA bereaksi dengan lebih baik dengan CO_2 dibanding dengan DEA. Namun, setelah mencapai konsentrasi tertentu, terlihat penambahan konsentrasi MEA dalam pelarut tidak berpengaruh signifikan terhadap k_L , bahkan untuk konsentrasi yang lebih tinggi, nilai koefisien perpindahan massa ini menurun.

Hal ini dapat disebabkan oleh tiga hal, pertama penurunan konsentrasi dari CO_2 . Semakin meningkatnya persentase berat MEA dalam pelarut, selain akan memperbanyak jumlah mol amina total, juga akan meningkatkan kemampuan absorpsi amina dengan CO_2 , mengingat reaksi MEA dengan CO_2 lebih baik dibanding DEA dengan CO_2 . Dengan meningkatnya kemampuan absorpsi ini, maka CO_2 yang terserap akan semakin banyak juga, dengan kata lain, konsentrasi CO_2 dalam selongsong akan menurun seiring meingkatnya persentase berat MEA. Sehingga pada persentase berat MEA tertentu, konsentrasi CO_2 dalam selongsong mencapai nilai yang cukup rendah di mana akan menurunkan kemampuan difusi CO_2 ke dalam membran. Hal ini menyebabkan peningkatan konsentrasi amina yang lebih tinggi, tidak berpengaruh signifikan terhadap penyerapan CO_2 .

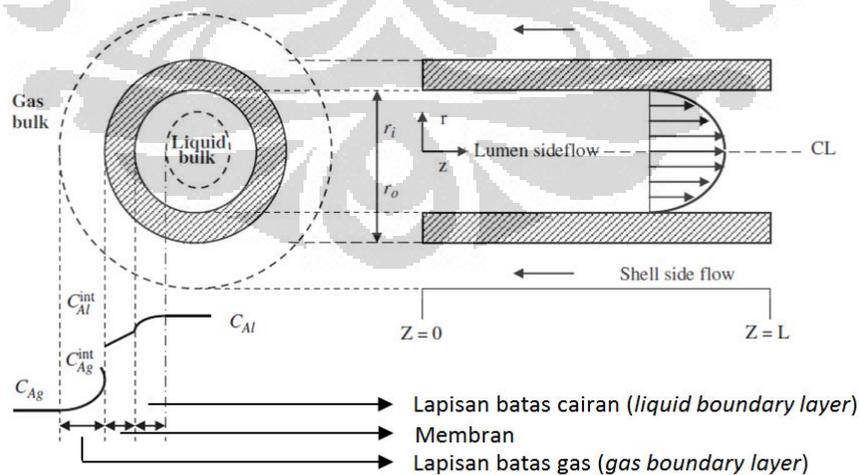
Penyebab kedua adalah adalah menurunnya luas kontak efektif membran. Penurunan koefisien perpindahan massa pada konsentrasi MEA yang tinggi telah

terjadi di beberapa penelitian sebelumnya (Rajabzadeh 2009; Kim 2000; deMontigny 2005; Boributh 2012). Teori penurunan luas kontak efektif membran ini sebenarnya masih memerlukan studi lebih lanjut, namun teori dapat menggambarkan bagaimana konsentrasi MEA yang tinggi dapat menurunkan efektifitas penyerapan CO_2 (Rajabzadeh 2009). Berikut adalah ilustrasi sistem absorpsi CO_2 melalui kontaktor membran serat berongga:



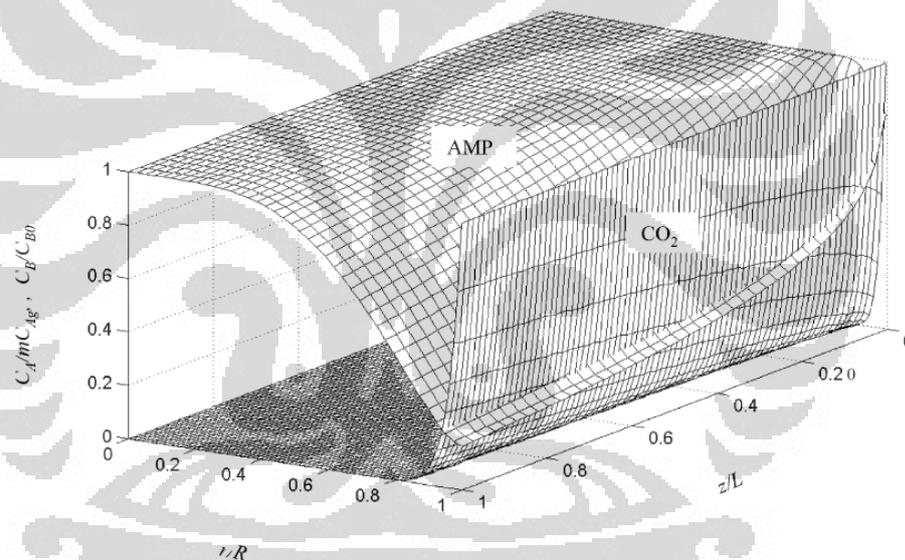
Gambar 4.2 Absorpsi CO_2 melalui kontaktor membran serat berongga

Sedangkan konfigurasi aliran yang terjadi dalam sistem di atas adalah sebagai berikut :



Gambar 4.3 Konfigurasi aliran pada sistem absorpsi CO_2 melalui kontaktor membran serat berongga

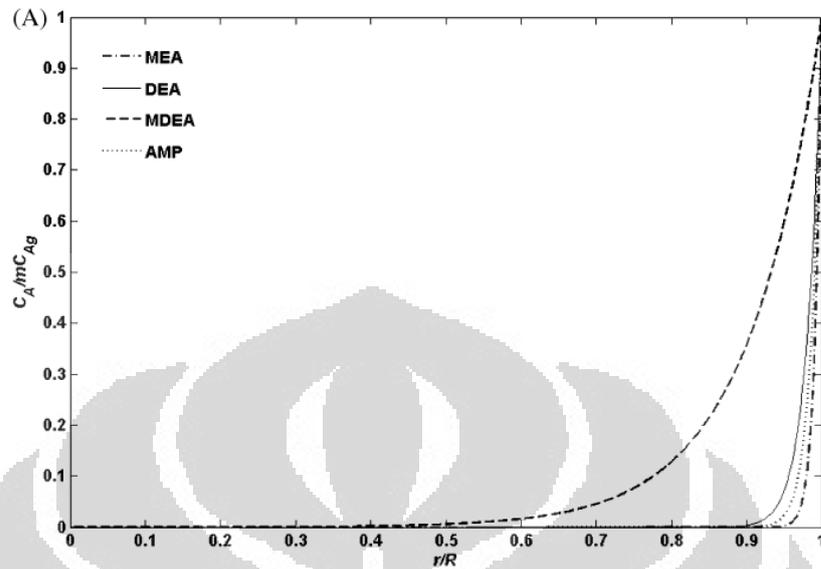
Lapisan film tipis fasa cair (*liquid boundary layer*) yang memisahkan membran dengan aliran pelarut (*liquid bulk*) menjadi bagian penting dari sistem ini karena menjadi pintu masuk sekaligus tempat utama terjadinya reaksi antara amina dan CO_2 . Difusivitas CO_2 ke dalam lapisan ini menjadi parameter yang cukup penting terhadap keseluruhan efektivitas absorpsi. Sebagai tempat awal CO_2 memasuki pelarut, maka konsentrasi CO_2 dalam lapisan ini sangat tinggi bahkan jenuh, sehingga reaksi antara amina dan CO_2 sebagian besar terjadi pada bagian ini. Akibatnya terdapat perbedaan konsentrasi yang sangat besar baik untuk CO_2 maupun pelarut antara sisi dinding membran dan di titik tengah membran. Sehingga lapisan ini juga dapat dilihat dengan mengamati gradien konsentrasi CO_2 maupun amina terhadap koordinat radial dari serat. Berikut adalah ilustrasi gradien konsentrasi CO_2 dan amina sepanjang serat membran :



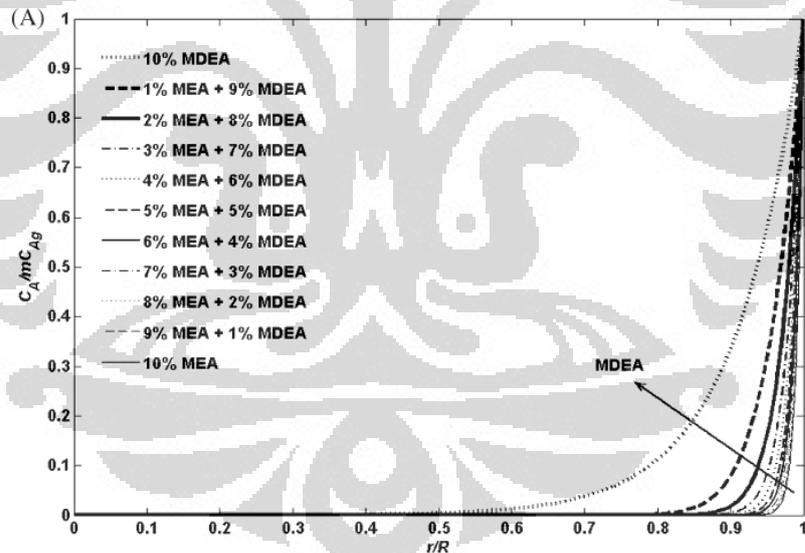
Gambar 4.4 Simulasi konsentrasi CO_2 dan pelarut AMP sepanjang serat
(Wang 2004)

Dari gambar di atas dapat terlihat konsentrasi CO_2 sangat tinggi pada bagian tepi serat dan berkurang secara signifikan pada sisi tengah serat. Lapisan film fasa cair ini tergambar dari profil konsentrasi CO_2 dan/atau amina seperti pada gambar di atas tersebut dan semakin kuat suatu pelarut untuk mengikat CO_2 , maka lapisan ini akan semakin tipis. Kekuatan pelarut untuk mengikat CO_2 ini dapat dipengaruhi oleh jenis senyawa yang terkandung dan konsentrasinya.

Berikut adalah grafik yang menggambarkan pengaruh kekuatan pelarut dalam mengikat CO₂ terhadap tebal lapisan film fasa cair :



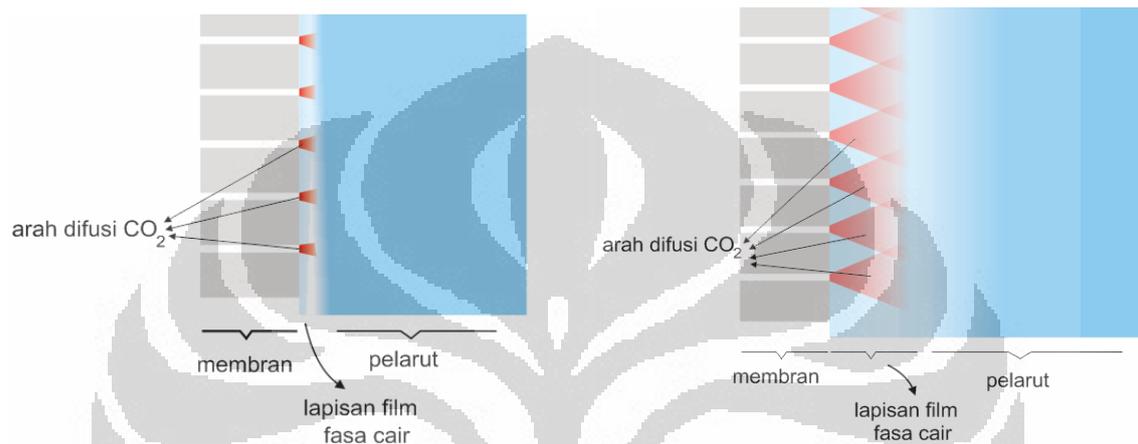
Gambar 4.5 Profil Konsentrasi CO₂ terhadap koordinat radial serat pada jenis pelarut yang berbeda (Paul 2007)



Gambar 4.6 Profil Konsentrasi CO₂ terhadap koordinat radial serat pada konsentrasi pelarut yang berbeda (Paul 2007)

Dari kedua grafik di atas dapat disimpulkan bahwa dalam penelitian ini, semakin tinggi konsentrasi MEA, maka lapisan film fasa cair akan semakin tipis. Ketebalan lapisan film ini ternyata berpengaruh terhadap luas kontak efektif membran. Pada absorpsi dengan pelarut yang lemah (absorpsi fisika lebih

dominan daripada absorpsi kimia), tebal lapisan film ini relatif besar dan jauh melebihi jarak antar pori-pori membran. Sebaliknya pada absorpsi kimia, tebal lapisan ini sangat tipis bahkan lebih tipis dari jarak antar pori-pori. Karena kecenderungan arah difusi CO_2 dari pori-pori membran ke lapisan film adalah tegak lurus, maka lapisan film yang tebal akan lebih diuntungkan, dan sebaliknya untuk lapisan yang tipis.

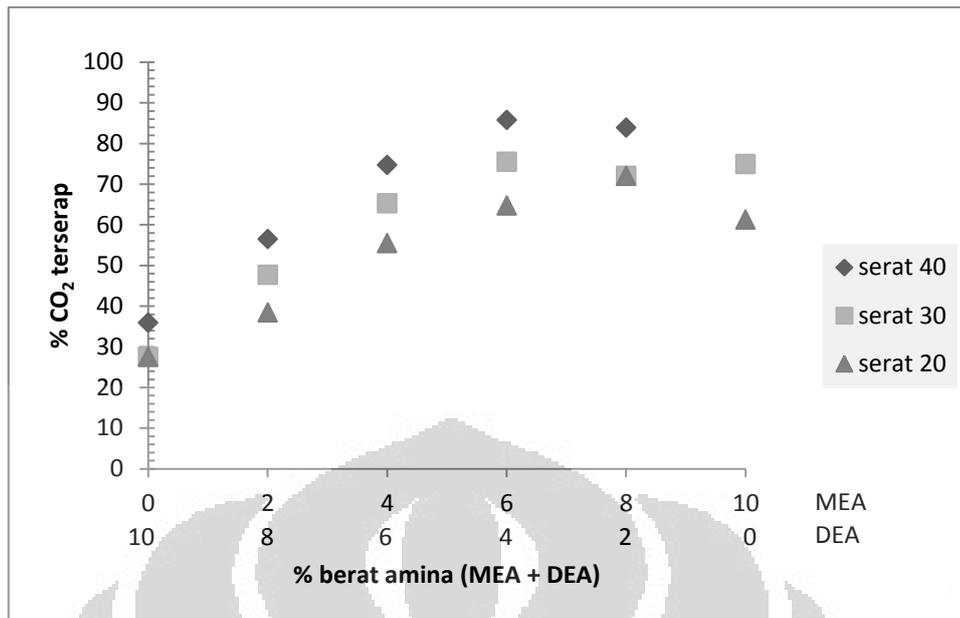


Gambar 4.7 Pengaruh ketebalan lapisan film fasa cair terhadap luas kontak efektif

Dari gambar di atas, terlihat bahwa lapisan film fasa cair yang tipis menyebabkan berkurangnya luas kontak gas-cair yang efektif. Oleh karena semakin tinggi konsentrasi MEA dapat menyebabkan semakin tipisnya lapisan ini, maka hal ini dapat menjadi salah satu penyebab mengapa pada konsentrasi MEA yang tinggi, penyerapan CO_2 justru semakin melemah.

Hal ini diperkuat dengan laju alir pelarut yang sangat kecil (300 cc/menit). Dengan laju alir ini aliran pelarut mempunyai bilangan Re sebesar 11,7; 15,6; dan 23,4 masing-masing berurutan untuk jumlah serat 40; 30; dan 20. Nilai Re kurang dari 25 ini mengindikasikan bahwa aliran dalam serat sangat linier dan tidak terjadi desiran (Bird 1960). Hal ini membuat lapisan film terjaga dengan baik.

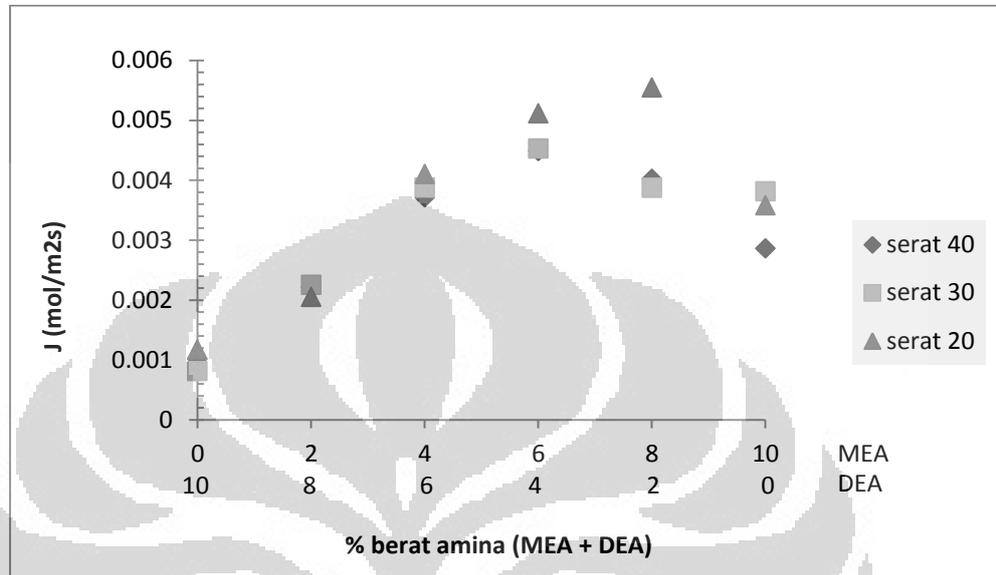
Penyebab ketiga adalah berkurangnya kelarutan CO_2 dalam pelarut akibat produk reaksi antara MEA dan CO_2 . Berikut adalah grafik yang menunjukkan persentase CO_2 yang terserap oleh pelarut :



Gambar 4.8 Grafik persentase CO₂ setelah melewati modul

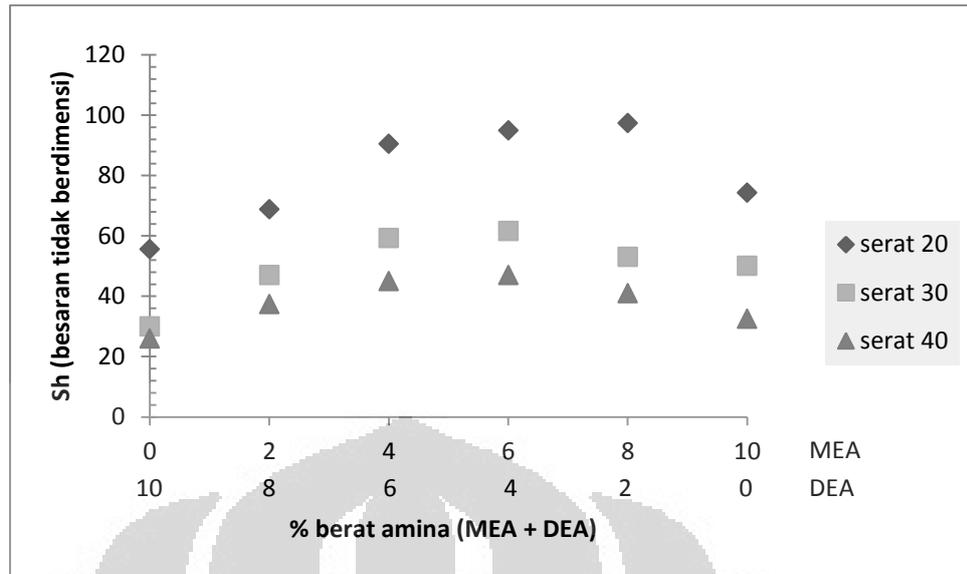
Dari grafik di atas terlihat bahwa CO₂ yang terserap semakin meningkat dengan meningkatnya konsentrasi berat MEA hingga pada konsentrasi MEA yang tinggi, CO₂ terserap menunjukkan nilai yang menurun. Oleh karena itu, sesuai dengan grafik ini, banyaknya CO₂ yang bereaksi dengan MEA akan semakin banyak seiring bertambahnya konsentrasi MEA. Reaksi antara kedua senyawa ini akan menghasilkan senyawa karbamat yang akan menurunkan kelarutan CO₂ ke dalam pelarut (Rajabzadeh 2009). Semakin tinggi konsentrasi MEA, maka reaksi akan berlangsung dengan cepat, sehingga senyawa karbamat akan muncul lebih awal, yaitu pada panjang modul yang lebih pendek. Karena karbamat sudah berkonsentrasi cukup tinggi pada bagian awal modul, maka penyerapan untuk sisa panjang modul selanjutnya akan terganggu, sehingga pelarut dengan konsentrasi 8% MEA + 2% DEA untuk jumlah serat 30 dan 40 serta konsentrasi 10% MEA untuk jumlah serat 20 menunjukkan penurunan tingkat penyerapan. Berbeda dengan MEA dengan konsentrasi yang lebih rendah (6% MEA + 4% DEA). Untuk konsentrasi ini, walaupun CO₂ yang bereaksi lebih banyak, dengan kata lain senyawa karbamat yang terbentuk semakin banyak, namun pembentukan karbamat terjadi lebih merata di sepanjang modul, sehingga penyerapan masih dapat terjadi pada panjang modul yang cukup sebelum konsentrasi karbamat benar-benar menghambat penyerapan.

Penurunan efektivitas penyerapan CO_2 pada konsentrasi MEA yang tinggi oleh ketiga penyebab di atas terlihat juga pada fluks CO_2 seperti ditunjukkan oleh grafik berikut ini :



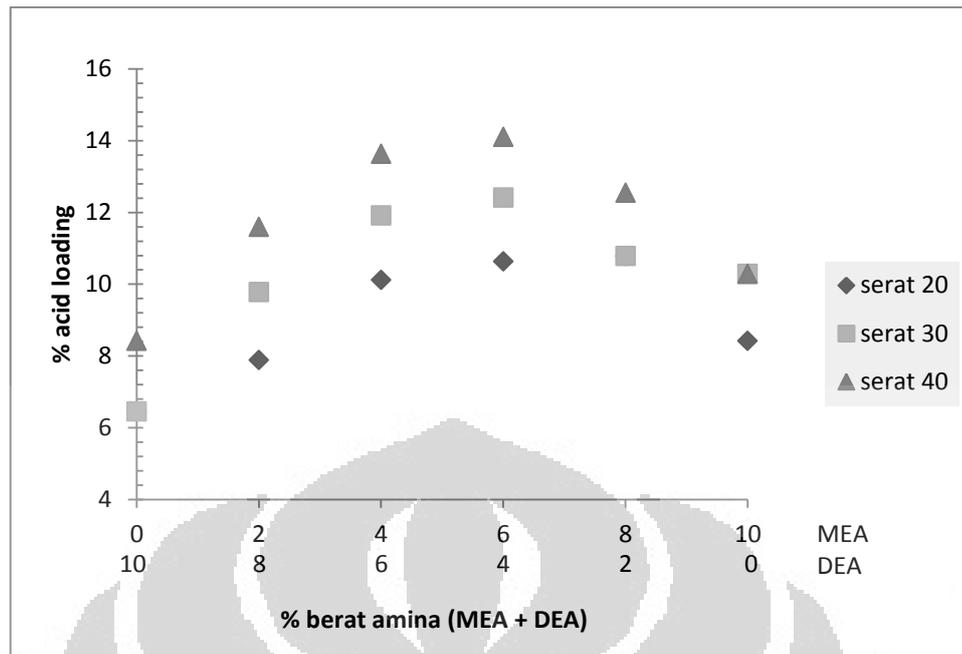
Gambar 4.9 Grafik pengaruh komposisi amina terhadap fluks CO_2

Sama halnya dengan fluks, bilangan Sherwood juga memiliki profil yang naik ketika konsentrasi MEA dalam pelarut bertambah, namun mencapai puncak pada konsentrasi optimum kemudian turun pada konsentrasi MEA yang lebih tinggi. Bilangan Sherwood menunjukkan efektivitas pengikatan CO_2 oleh pelarut mengingat besarnya porsi difusi CO_2 ke dalam pelarut. Secara umum bilangan Sherwood melambangkan tingkat perpindahan massa konveksi. Berikut adalah grafik yang menunjukkan bilangan Sherwood terhadap komposisi amina :



Gambar 4.10 Grafik pengaruh komposisi amina terhadap bilangan Sherwood

Salah satu parameter yang menggambarkan keefisienan amina dalam menangkap CO_2 adalah *acid loading*. *Acid loading* merupakan perbandingan antara mol CO_2 dalam pelarut setelah melewati modul dengan jumlah mol amina awal. Semakin tinggi nilai *acid loading* ini, maka setiap mol amina akan membawa lebih banyak CO_2 , dengan kata lain amina menjadi lebih efisien. Berikut adalah grafik yang menggambarkan pengaruh komposisi pelarut terhadap *acid loading* :



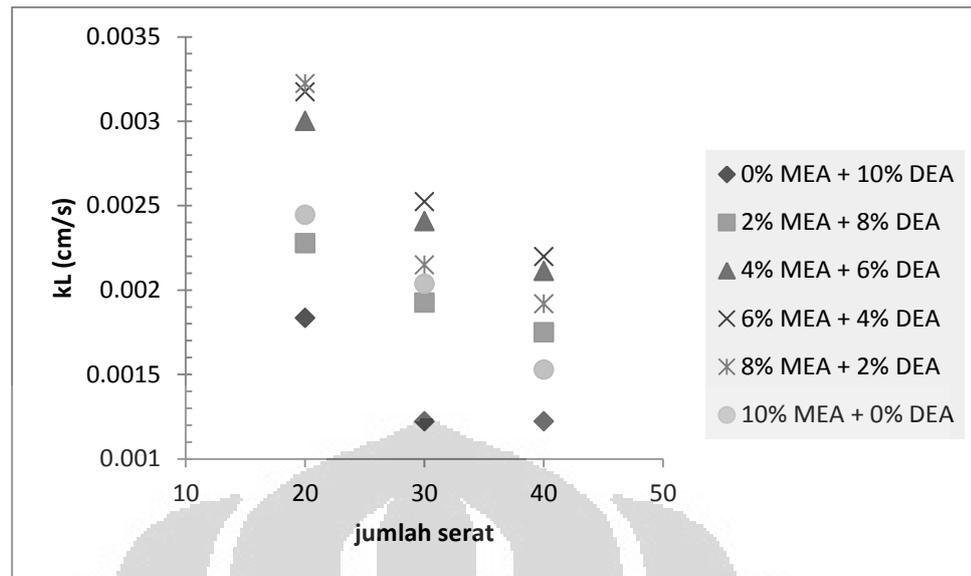
Gambar 4.11 Grafik pengaruh komposisi amina terhadap *acid loading*

Dari grafik di atas, semakin tinggi konsentrasi MEA, maka *acid loading* semakin tinggi, namun kemudian turun pada konsentrasi MEA yang tinggi. Jika dibandingkan dengan Grafik 4.8, secara keseluruhan kecenderungan grafik ini hampir sama. Namun pada konsentrasi MEA yang lebih tinggi, penurunan *acid loading* relatif lebih besar. Hal ini dikarenakan walaupun CO₂ yang diserap berkurang pada nilai tertentu, namun asupan amina dalam pelarut juga bertambah, sehingga nilai *acid loading* semakin kecil dan penurunannya terlihat lebih jelas.

4.2 Pengaruh Jumlah Serat pada Perpindahan Massa

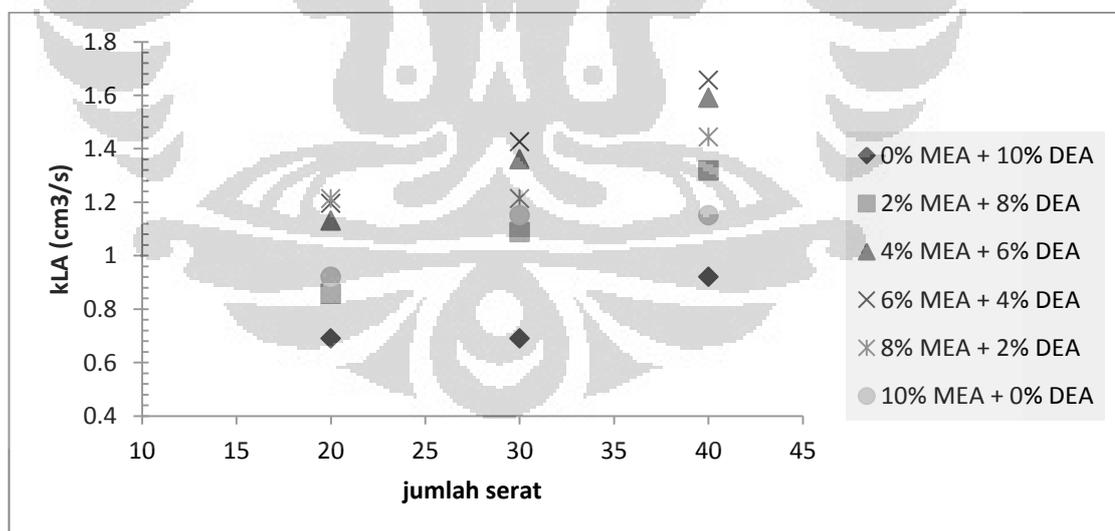
Jumlah serat yang digunakan dalam percobaan ini adalah 20; 30; dan 40. Semakin bertambahnya jumlah serat pada modul maka akan memperbesar luas kontak antara gas dan cairan. Luas kontak ini penting untuk mendapatkan kapasitas absorpsi yang besar. Dengan bertambahnya serat, maka pelarut akan terfasilitasi untuk menjangkau CO₂ yang mengalir dalam selongsong dengan lebih baik, sehingga dalam kondisi tekanan atau konsentrasi CO₂ yang rendah, pelarut masih dapat menyerap CO₂.

Berikut adalah grafik koefisien perpindahan massa terhadap jumlah serat :



Gambar 4.12 Grafik pengaruh jumlah serat terhadap k_L

Pada grafik ini terlihat bahwa semakin bertambahnya jumlah serat pada modul akan menurunkan koefisien perpindahan massa. Sedangkan untuk kapasitas penyerapan, berlaku sebaliknya, di mana jumlah serat berbanding lurus dengan kapasitas penyerapan.

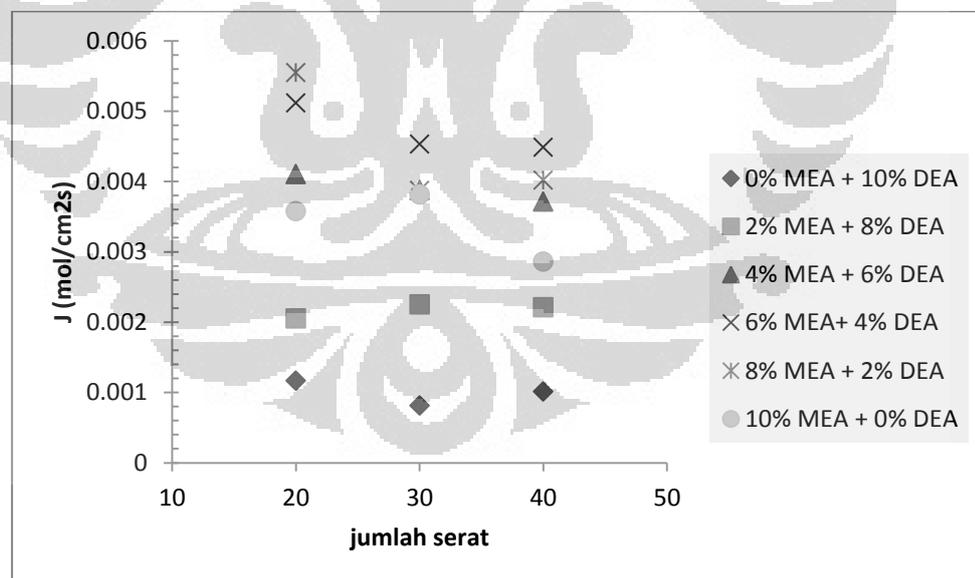


Gambar 4.13 Grafik pengaruh jumlah serat terhadap kapasitas penyerapan

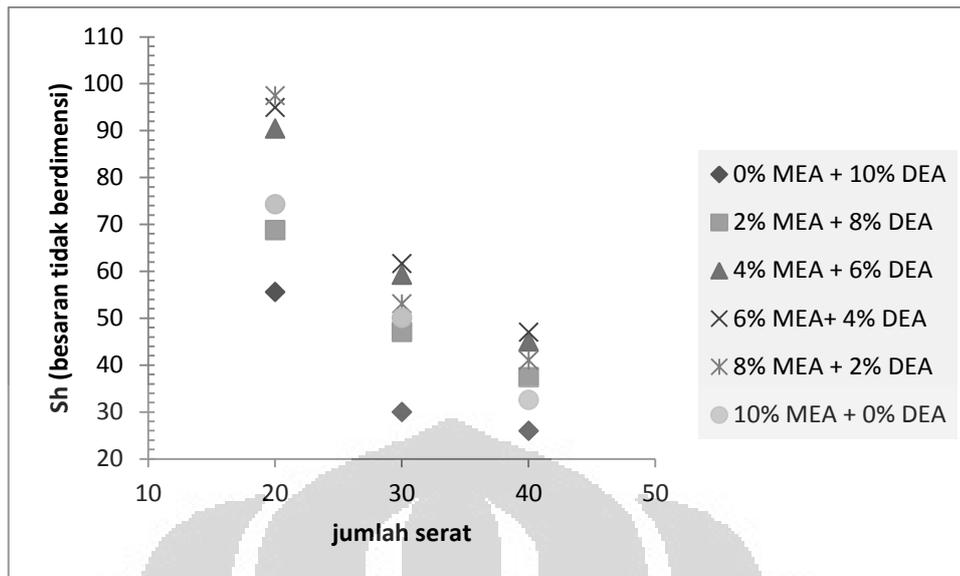
Bertambahnya luas kontak gas-cair tidak berarti meningkatkan konsentrasi CO_2 dalam pelarut. Sebaliknya, dengan jumlah CO_2 yang sama, semakin banyak jumlah serat dalam modul, maka jumlah CO_2 ini akan terbagi-bagi pada serat yang

lebih banyak. Selain itu, dengan laju alir yang sama, membran dengan jumlah serat 20 akan memiliki laju linier yang lebih besar dibanding membran dengan jumlah serat lebih banyak. Peningkatan laju linier pelarut dalam serat akan menurunkan tahanan pada lapisan cairan dan meningkatkan turbulensi aliran yang akan berpengaruh baik pada distribusi konsentrasi radial pelarut sehingga absorpsi lebih optimum. Hal ini menyebabkan koefisien perpindahan massa per satuan luas untuk serat 20 lebih tinggi daripada serat 30 dan 40. Namun jika daya penyerapan ini dijumlahkan pada semua luas serat membran, maka serat 40 memiliki daya penyerapan paling baik. Hal ini dikarenakan jangkauan yang lebih baik akan CO_2 dalam selongsong dan menghindari kejenuhan CO_2 untuk berdifusi ke permukaan membran.

Koefisien perpindahan massa (k_L) mempunyai kecenderungan yang sama dengan profil fluks CO_2 dan bilangan Sherwood, karena tahanan film liquid mempunyai pengaruh yang sangat besar terhadap perpindahan massa, sehingga dengan laju linier lebih besar, jumlah serat 20 mempunyai fluks dan bilangan Sherwood paling tinggi, diikuti dengan modul dengan jumlah serat 30 dan 40.



Gambar 4.14 Grafik pengaruh jumlah serat terhadap fluks CO_2

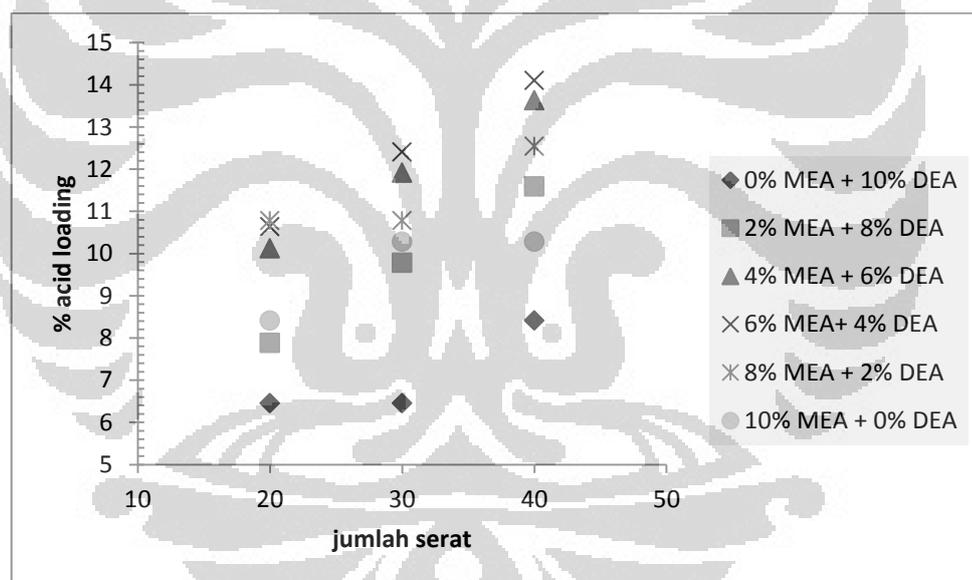


Gambar 4.15 Grafik pengaruh jumlah serat terhadap bilangan Sherwood

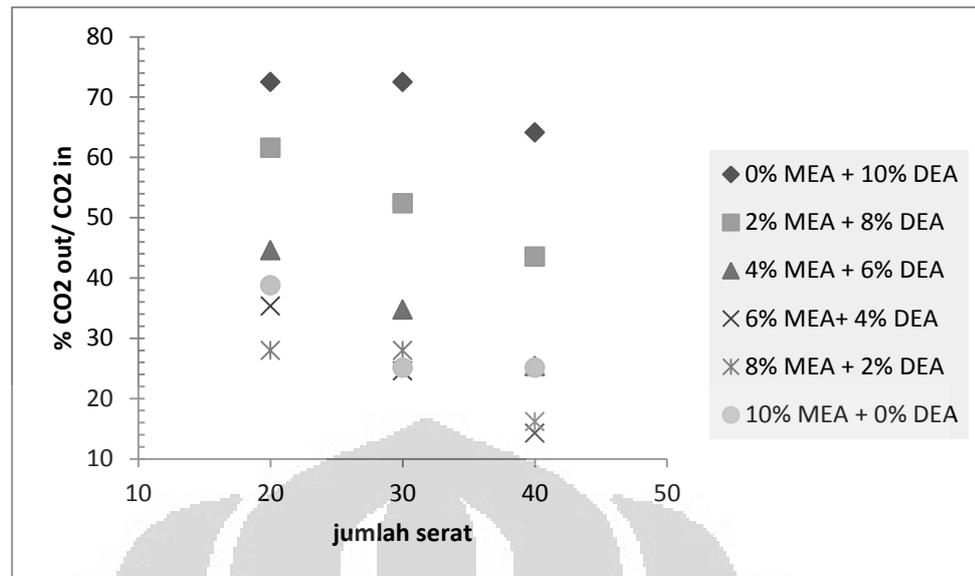
Secara umum, semakin besar jumlah serat yang digunakan, maka fluks CO_2 akan semakin rendah. Dengan luas yang lebih kecil, setiap satuan luas dari modul dengan jumlah serat 20 akan mendapat kesempatan yang lebih besar untuk menyerap CO_2 , dengan catatan laju alir CO_2 untuk semua modul bernilai sama. Oleh karena itu fluks akan lebih besar untuk jumlah serat yang lebih kecil. Namun untuk konsentrasi MEA yang rendah, terlihat bahwa kecenderungan data berlaku sebaliknya. Hal ini disebabkan pada konsentrasi MEA yang rendah, CO_2 dalam selongsong masih relatif banyak (Gambar 4.8). Bahkan di beberapa titik dalam Grafik 4.9 terlihat saling berhimpit, menunjukkan bahwa besarnya fluks untuk kondisi ini tidak jauh berbeda antara jumlah serat 20; 30; dan 40. Perbedaan fluks antar jumlah serat pada konsentrasi MEA yang rendah pada Gambar 4.14 juga menunjukkan nilai yang sangat kecil, sehingga pengaruh dari profil ini tidak terlalu besar.

Untuk *acid loading* sendiri, jumlah serat berbanding lurus dengan *acid loading*. Hal ini sangat dipengaruhi oleh kapasitas penyerapan seperti ditunjukkan pada Grafik 4.13 sebelumnya. Dengan laju alir volume yang sama, kecepatan linier dari jumlah serat 20 akan lebih besar dari jumlah serat 30 dan kemudian 40. Dengan laju linier lebih kecil, pelarut dalam modul dengan jumlah serat 40 memiliki waktu tinggal yang lebih lama. Waktu untuk bereaksi dengan CO_2 ini cukup berpengaruh terhadap jumlah penyerapan CO_2 . Selain itu, dengan

bertambahnya serat, luas kontak efektif membran lebih besar. Dalam penjelasan pada subbab 4.1 telah dijelaskan bahwa lapisan film fasa cair memiliki peranan yang sangat penting sebagai tempat terjadinya reaksi antara pelarut dan CO_2 . Konsentrasi CO_2 hanya tertumpuk pada bagian dinding membran dan hampir tidak ada perubahan konsentrasi pelarut pada bagian tengah membran. Hal ini mengindikasikan bahwa pelarut efektif hanya berada pada bagian yang berdekatan dengan dinding membran saja. Sehingga dengan bertambahnya jumlah membran, akan menambah lapisan film tersebut dan mengurangi jumlah volume pelarut yang kurang efektif sehingga meningkatkan potensi kontak pelarut- CO_2 lewat lapisan film tersebut. Penjelasan ini didukung dengan semakin baiknya hasil keluaran gas CO_2 setelah melewati membran untuk jumlah serat yang lebih banyak.



Gambar 4.16 Grafik pengaruh jumlah serat terhadap *acid loading*



Gambar 4.17 Grafik pengaruh jumlah serat terhadap persentase CO₂ setelah melewati modul

4.3 Analisa Hasil Percobaan

Berikut adalah neraca massa untuk tiap variasi yang telah dilakukan dalam penelitian ini :

Tabel 4.2 Neraca massa untuk semua variasi

No	Jumlah serat	Komposisi (%wt)		Masuk (mol/menit)		Keluar (mol/menit)			% CO ₂ terserap
		MEA	DEA	CO ₂	Amina	CO ₂	Amina	Karbamat	
1	40	0	10	0.0675	0.288	0.0433	0.239	0.0242	35.87
2		2	8	0.0675	0.329	0.0294	0.253	0.0381	56.47
3		4	6	0.0675	0.370	0.0171	0.269	0.0504	74.65
4		6	4	0.0675	0.411	0.0096	0.295	0.0579	85.75
5		8	2	0.0675	0.451	0.0109	0.338	0.0566	83.84
6		10	0	0.0675	0.492	0.0169	0.391	0.0506	74.90
7	30	0	10	0.0675	0.288	0.0489	0.251	0.0186	27.51
8		2	8	0.0675	0.329	0.0353	0.265	0.0322	47.65
9		4	6	0.0675	0.370	0.0235	0.282	0.0441	65.26
10		6	4	0.0675	0.411	0.0166	0.309	0.0509	75.46
11		8	2	0.0675	0.451	0.0189	0.354	0.0486	72.05
12		10	0	0.0675	0.492	0.0169	0.391	0.0506	74.90
13	20	0	10	0.0675	0.288	0.0489	0.251	0.0186	27.51
14		2	8	0.0675	0.329	0.0416	0.277	0.0259	38.41
15		4	6	0.0675	0.370	0.0301	0.295	0.0374	55.43
16		6	4	0.0675	0.411	0.0238	0.323	0.0437	64.68
17		8	2	0.0675	0.451	0.0189	0.354	0.0486	72.05
18		10	0	0.0675	0.492	0.0261	0.409	0.0414	61.27

Dari tabel di atas, disimpulkan bahwa kondisi operasi terbaik dalam studi penelitian ini adalah modul dengan jumlah serat 40 dan menggunakan pelarut dengan komposisi 6% MEA + 4% DEA. Dengan kondisi operasi ini, CO₂ dapat diserap hingga 85,75 %. Namun kondisi ini berbeda dengan kondisi operasi di mana nilai koefisien perpindahan massa (k_L) paling optimum dapat dicapai, yaitu modul dengan jumlah serat 20 dan pelarut dengan komposisi 8% MEA + 2% DEA. Hasil ini berlaku juga untuk fluks CO₂ dan bilangan Sherwood.

Baik koefisien perpindahan massa, fluks CO₂, ataupun bilangan Sherwood, secara umum menjelaskan hal yang sama yaitu efektivitas perpindahan massa relatif terhadap suatu variabel. Efektivitas ini dapat dicontohkan dengan nilai perpindahan massa per satuan luas membran, yang berarti parameter-parameter ini mencapai nilai optimumnya ketika luas yang dibutuhkan sedikit namun perpindahan massa yang terjadi besar. Sehingga parameter-parameter ini secara garis besar menunjukkan keuntungan yang paling besar di antara variasi-variasi percobaan dan tidak dapat dijadikan sebagai acuan atas hasil akhir dari proses penyerapan, dalam hal ini persentase CO₂ yang keluar dari modul.

Sedangkan menurut *acid loading*, kondisi operasi paling optimum yang dapat dicapai adalah pada modul dengan jumlah serat 40 dan pelarut dengan komposisi 6% MEA + 4% DEA. Parameter *acid loading* ini tidak dapat juga dijadikan sebagai acuan hasil akhir proses absorpsi, namun dapat menilai komposisi yang paling efisien dalam menyerap CO₂. Untuk memperkirakan hasil akhir proses penyerapan, selain *acid loading*, juga harus diperhatikan laju alir pelarut, laju alir gas, tekanan, dan suhu. Namun, dalam penelitian ini laju alir pelarut dan gas serta suhu dan tekanan untuk tiap variasi bernilai sama, sehingga kondisi optimum menurut *acid loading* sama dengan kondisi optimum menurut perhitungan persen penyerapan CO₂.

Komposisi pelarut optimum yang diperoleh dari percobaan ini masih berpotensi ditingkatkan lagi dengan penambahan konsentrasi DEA, mengingat dalam studi penelitian ini tidak ditemukan adanya batas (*peak*) dari konsentrasi DEA seperti pada MEA. Namun penambahan konsentrasi amina (6% MEA + 4% DEA) dalam pelarut dapat memberikan pengaruh lain terhadap membran dan aliran fluida dalam membran. Penambahan DEA akan berpotensi meningkatkan

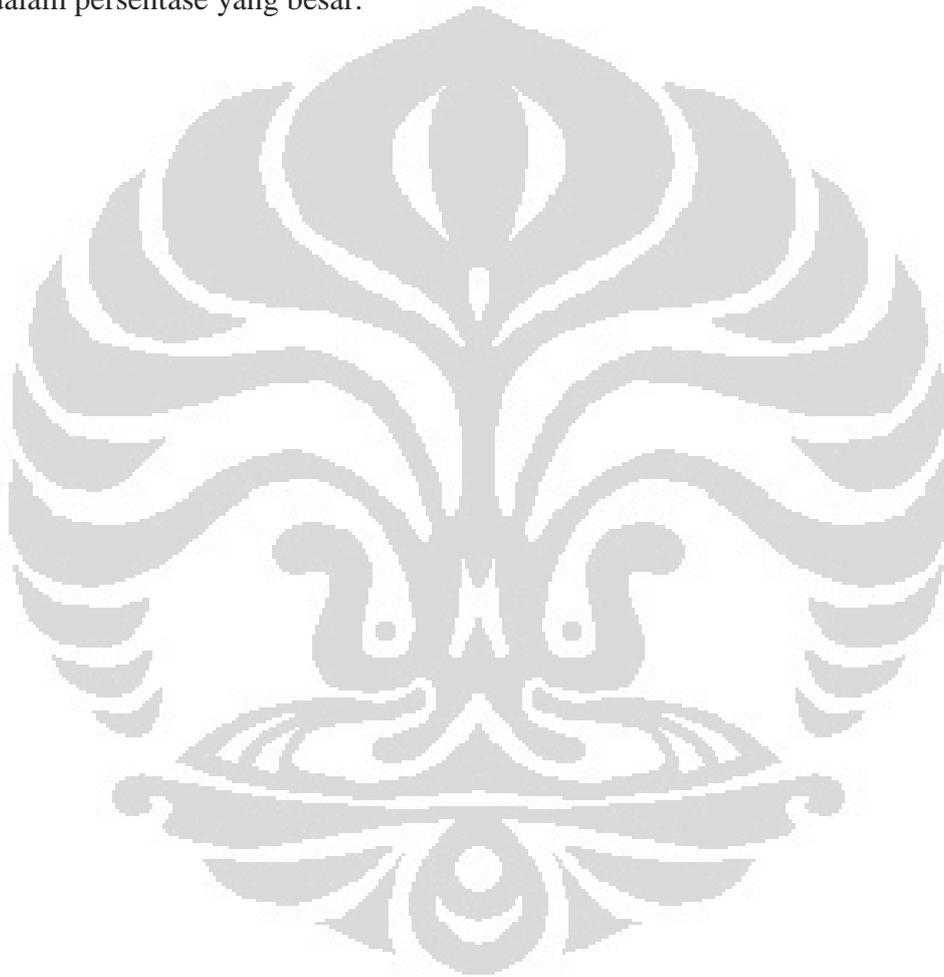
potensi pembasahan membran yang sangat meningkatkan resistansi membran. Selain itu, konsentrasi DEA yang tinggi juga dapat memicu degradasi atau perusakan membran.

Penambahan konsentrasi DEA juga akan menambah viskositas dari pelarut. Penambahan viskositas ini akan menurunkan turbulensi aliran pelarut dalam membran bahkan dapat menimbulkan aliran yang sangat laminar di mana muncul lapisan yang diam (*stagnant*) pada dinding membran. Lapisan ini dapat mengurangi difusivitas gas ke dalam pelarut selain juga menghindari distribusi konsentrasi radial pelarut. Hal ini menyebabkan amina yang tidak dapat terkontak dan bereaksi dengan CO₂ berjumlah jauh lebih besar. Sehingga kesimpulannya penambahan DEA ke dalam komposisi optimum hasil penelitian ini belum tentu dapat meningkatkan kemampuan pelarut dalam menyerap CO₂.

Optimasi lain adalah dengan menambah laju alir pelarut. Penambahan laju alir pelarut dapat menghindari kejenuhan pelarut dan juga meningkatkan turbulensi dari aliran. Dalam penelitian-penelitian sebelumnya juga disebutkan bahwa penambahan laju alir akan meningkatkan fluks CO₂. Namun peningkatan laju alir juga dapat memicu terjadinya pembasahan membran. Selain itu *acid loading* dalam penelitian ini cukup rendah, sehingga pelarut masih jauh dari kesetimbangan (jenuh). Penambahan laju alir juga berarti penambahan biaya operasi, sehingga penambahan laju alir dapat menjadi alternatif peningkatan performa kontaktor membran namun dengan keuntungan yang tidak maksimal.

Parameter lain untuk melihat efektivitas kontaktor ini adalah $k_{L}a$ dengan mengalikan k_L dengan a (luas spesifik). Dari perhitungan ini diperoleh data $k_{L}a$ untuk pelarut 6% MEA + 4% DEA adalah 0,0092 (s⁻¹) ; sedangkan kontaktor kolom konvensional memiliki $k_{L}a$ sebesar 0.05 (s⁻¹) (Rangwala 1996). Dari nilai ini disimpulkan bahwa kontaktor membran yang digunakan dalam percobaan ini masih belum mampu melebihi kemampuan kontaktor kolom konvensional. Namun di lain sisi, teknologi ini cukup menjanjikan mengingat konfigurasi yang lebih fleksibel, sehingga memungkinkan operasi menggunakan beberapa modul yang disusun secara seri. Jumlah serat yang relatif sangat sedikit (40 serat) juga dapat menjadi alasan kecilnya nilai $k_{L}a$. Dalam penelitian sebelumnya, digunakan modul dengan jumlah serat hingga 9000 dan menghasilkan nilai $k_{L}a$

yang lebih baik (Rangwala 1996). Sehingga potensi peningkatan $k_L a$ lewat jumlah serat dalam penelitian ini cukup besar. Jumlah energi yang dibutuhkan juga jauh lebih kecil dibandingkan kontaktor kolom konvensional, yaitu 0,39 kWh/kg-CO₂ untuk kontaktor kolom dan 0,072 kWh/Kg-CO₂ untuk kontaktor membran (Matsumiya 2005). Secara umum, hasil penelitian ini menyatakan bahwa kontaktor membran mempunyai performa yang cukup baik. Dengan konfigurasi yang jauh lebih sederhana, kontaktor membran ini juga dapat menyerap CO₂ dalam persentase yang besar.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan mengenai absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga dengan pelarut campuran amina, maka dapat disusun beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Pelarut campuran amina (MEA dan DEA) mempunyai tingkat penyerapan yang lebih baik dari pada amina tunggal.
2. Komposisi pelarut terbaik adalah 6% MEA + 4% DEA (persen berat). Dengan konsentrasi ini, CO₂ dapat diserap hingga 85,57% dengan kapasitas penyerapan 1,66 cm³/s pada modul dengan jumlah serat 40.
3. Semakin besar jumlah serat pada modul akan meningkatkan kapasitas penyerapan, namun menurunkan nilai k_L dan fluks perpindahan massa.
4. Performa kontaktor membran dalam penelitian ini masih belum lebih baik dibanding kontaktor kolom. Nilai k_{La} dari kontaktor membran dalam penelitian ini adalah 0,0092 s⁻¹ sedangkan kontaktor kolom sebesar 0,05 s⁻¹. Namun potensi untuk dapat melebihi kontaktor kolom cukup besar dengan peningkatan jumlah serat dan penggunaan lebih dari satu modul dalam satu sistem.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan adalah perbaikan jenis material membran sehingga lebih kuat dan tahan terhadap reaktifitas amina dan penggunaan CO₂ *electrode* untuk pengukuran konsentrasi CO₂ dalam pelarut.

DAFTAR PUSTAKA

- Barth, D., C. Tondre & J. J. Delpuech. (1984). "Kinetics and mechanisms of the reactions of carbon dioxide with alkanolamines: a discussion concerning the cases of MDEA and DEA." Chemical Engineering Science **39**(12): 1753-1757.
- Boributh, S., W. Rongwong, S. Assabumrungrat, N. Laosiripojana & R. Jiratananon. (2012). "Mathematical modeling and cascade design of hollow fiber membrane contactor for CO₂ absorption by monoethanolamine." Journal of Membrane Science **401–402**(0): 175-189.
- Cooney, D. O. and C. C. Jackson (1989). "Gas Absorption In A Hollow Fiber Device." Chemical Engineering Communications **79**(1): 153-163.
- deMontigny, D., P. Tontiwachwuthikul & A. Chakma. (2005). "Comparing the Absorption Performance of Packed Columns and Membrane Contactors." Industrial & Engineering Chemistry Research **44**(15): 5726-5732.
- Franco, J. A., D. deMontigny, S. E. Kentish, J. M. Perera & G. W. Stevens. (2009). "Effect of amine degradation products on the membrane gas absorption process." Chemical Engineering Science **64**(18): 4016-4023.
- Gong, Y., Z. Wang, & S. Wang. (2006). "Experiments and simulation of CO₂ removal by mixed amines in a hollow fiber membrane module." Chemical Engineering and Processing: Process Intensification **45**(8): 652-660.
- Juang, R.-S. and H.-L. Huang (2003). "Mechanistic analysis of solvent extraction of heavy metals in membrane contactors." Journal of Membrane Science **213**(1–2): 125-135.
- Karoor, S. and K. K. Sirkar (1993). "Gas absorption studies in microporous hollow fiber membrane modules." Industrial & Engineering Chemistry Research **32**(4): 674-684.

- Kim, Y.-S. and S.-M. Yang (2000). "Absorption of carbon dioxide through hollow fiber membranes using various aqueous absorbents." Separation and Purification Technology **21**(1–2): 101-109.
- Lin, S.-H., K.-L. Tung, W.-J. Chen & H.-W. Chang. (2009). "Absorption of carbon dioxide by mixed piperazine–alkanolamine absorbent in a plasma-modified polypropylene hollow fiber contactor." Journal of Membrane Science **333**(1–2): 30-37.
- Lu, J.-G., H. Zhang, M.-D. Cheng & L.-J. Wang. (2009). "CO₂ capture through membrane gas absorption with aqueous solution of inorganic salts-amino acid salts." Journal of Fuel Chemistry and Technology **37**(1): 77-81.
- Lu, J.-G., H. Zhang, M.-D. Cheng & L.-J. Wang. (2007). "Effects of activators on mass-transfer enhancement in a hollow fiber contactor using activated alkanolamine solutions." Journal of Membrane Science **289**(1–2): 138-149.
- Matsumiya, N., M. Teramoto, S. Kitada & H. Matsuyama. (2005). "Evaluation of energy consumption for separation of CO₂ in flue gas by hollow fiber facilitated transport membrane module with permeation of amine solution." Separation and Purification Technology **46**(1–2): 26-32.
- Matsumura, M. and H. Märkl (1986). "Elimination of ethanol inhibition by perstraction." Biotechnology and Bioengineering **28**(4): 534-541.
- Paul, S., A. K. Ghoshal & B. Mandal. (2007). "Removal of CO₂ by Single and Blended Aqueous Alkanolamine Solvents in Hollow-Fiber Membrane Contactor: Modeling and Simulation." Industrial & Engineering Chemistry Research **46**(8): 2576-2588.
- Pierre, F. X., I. Souchon & M. Marin. (2002). "Membrane-based solvent extraction of sulfur aroma compounds: influence of operating conditions on mass transfer coefficients in a hollow fiber contactor." Desalination **148**(1–3): 199-204.

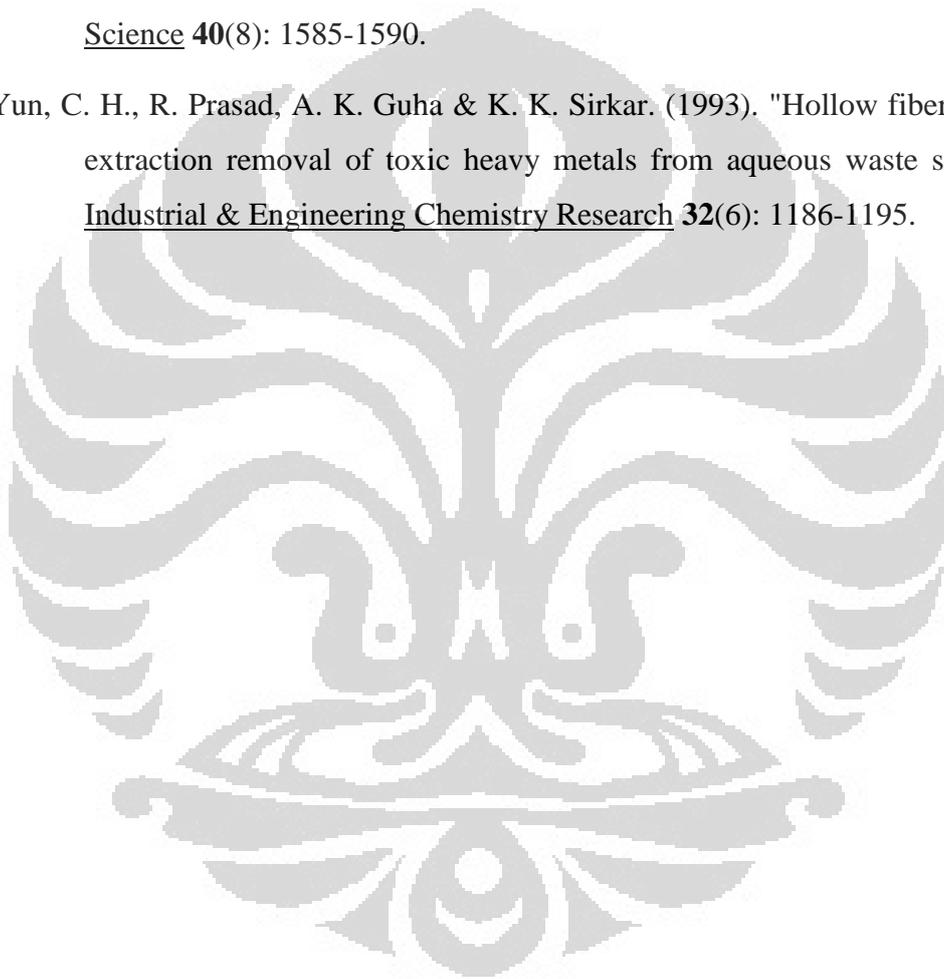
- Pierre, F. X., I. Souchon & M. Marin, et al. (2001). "Recovery of sulfur aroma compounds using membrane-based solvent extraction." Journal of Membrane Science **187**(1–2): 239-253.
- Prasad, R. and K. K. Sirkar (1989). "Hollow fiber solvent extraction of pharmaceutical products: A case study." Journal of Membrane Science **47**(3): 235-259.
- Rajabzadeh, S., S. Yoshimoto, M. Teramoto, M. Al-Marzouqi & H. Matsuyama. (2009). "CO₂ absorption by using PVDF hollow fiber membrane contactors with various membrane structures." Separation and Purification Technology **69**(2): 210-220.
- Rangwala, H. A. (1996). "Absorption of carbon dioxide into aqueous solutions using hollow fiber membrane contactors." Journal of Membrane Science **112**(2): 229-240.
- Souchon, I., V. Athès, F.-X. Pierre & M. Marin. (2004). "Liquid-liquid extraction and air stripping in membrane contactor: application to aroma compounds recovery." Desalination **163**(1–3): 39-46.
- Vatai, G. and M. N. Tekic (1991). "Membrane-based ethanol extraction with hollow-fiber module." Journal Name: Separation Science and Technology; (United States); Journal Volume: 26:7; Medium: X; Size: Pages: 1005-1011.
- Wallace, D. W., J. Williams, C. Staudt-Bickel & W. J. Koros. (2006). "Characterization of crosslinked hollow fiber membranes." Polymer **47**(4): 1207-1216.
- Wang, K. Y., D. Fei Li, T.-S. Chung & S. Bor Chen. (2004). "The observation of elongation dependent macrovoid evolution in single- and dual-layer asymmetric hollow fiber membranes." Chemical Engineering Science **59**(21): 4657-4660.
- Wang, R., D. F. Li, C. Zhou, M. Liu & D. T. Liang. (2004). "Impact of DEA solutions with and without CO₂ loading on porous polypropylene

membranes intended for use as contactors." Journal of Membrane Science **229**(1-2): 147-157.

Yang, Z.-F., A. K. Guha & K. K. Sirkar. (1996). "Novel Membrane-Based Synergistic Metal Extraction and Recovery Processes." Industrial & Engineering Chemistry Research **35**(4): 1383-1394.

Yu, W.-C., G. Astarita & D. W. Savage. (1985). "Kinetics of carbon dioxide absorption in solutions of methyldiethanolamine." Chemical Engineering Science **40**(8): 1585-1590.

Yun, C. H., R. Prasad, A. K. Guha & K. K. Sirkar. (1993). "Hollow fiber solvent extraction removal of toxic heavy metals from aqueous waste streams." Industrial & Engineering Chemistry Research **32**(6): 1186-1195.



LAMPIRAN A
DATA PENELITIAN

Berikut adalah data hasil percobaan absorpsi CO₂ melalui membran PVC dengan pelarut campuran DEA dan MEA :

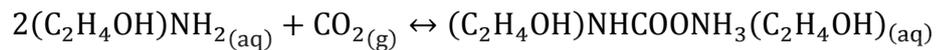
Tabel A.1 Data Hasil Percobaan

No	Jumlah Serat	Komposisi Pelarut		pH awal	pH akhir	T awal (°C)	T akhir (°C)
		MEA (% wt)	DEA (% wt)				
1	20	0	10	11.46	11.42	29	29.5
2		2	8	11.76	11.67	29	30
3		4	6	11.84	11.75	29	30
4		6	4	11.88	11.8	28.5	30
5		8	2	11.91	11.85	29	30
6		10	0	11.88	11.83	29	30
7	30	0	10	11.47	11.44	29	29.5
8		2	8	11.78	11.7	29	29.5
9		4	6	11.85	11.77	29	30
10		6	4	11.88	11.81	28.5	29.5
11		8	2	11.91	11.86	29	30
12		10	0	11.88	11.83	29	30
13	40	0	10	11.46	11.43	29	30
14		2	8	11.77	11.7	28.5	30
15		4	6	11.85	11.78	28.5	30
16		6	4	11.89	11.83	28.5	29.5
17		8	2	11.9	11.85	29	30
18		10	0	11.87	11.83	29	30.5

LAMPIRAN B PERHITUNGAN

B.1 Perhitungan Konsentrasi CO₂ yang Terlarut

Reaksi yang terjadi antara amina (DEA dan MEA) dengan CO₂ adalah sebagai berikut :



Dari persamaan reaksi di atas, konsentrasi CO₂ dapat diketahui dengan cara menghitung banyaknya amina yang bereaksi melalui pengurangan konsentrasi amina awal dan amina akhir, kemudian membaginya dengan koefisien reaksi. Karena sifatnya yang basa, konsentrasi amina ini sendiri dihitung melalui pH akan terukur saat percobaan.

$$\text{pOH} = 14 - \text{pH} \quad \text{B. 1}$$

$$[\text{OH}^-] = 10^{-\text{pOH}} \quad \text{B. 2}$$

$$[\text{basa}] = \frac{[\text{OH}^-]^2}{K_b} \quad \text{B. 3}$$

Namun dikarenakan amina yang digunakan dalam percobaan ini merupakan campuran dua senyawa amina yang memiliki K_b yang berbeda, maka perhitungannya menjadi sebagai berikut :

$$[\text{OH}^-] = [\text{OH}^-]_{\text{MEA}} + [\text{OH}^-]_{\text{DEA}} \quad \text{B. 4}$$

dengan $[\text{OH}^-]_{\text{MEA}}$ berarti konsentrasi OH⁻ yang berada dalam MEA dan $[\text{OH}^-]_{\text{DEA}}$ berarti konsentrasi OH⁻ yang ada dalam DEA.

$$[\text{OH}^-] = \sqrt{K_{b\text{MEA}}[\text{MEA}]} + \sqrt{K_{b\text{DEA}}[\text{DEA}]} \quad \text{B. 5}$$

jika K_{bMEA} dan K_{bDEA} dapat diketahui dari literatur, maka persamaan di atas masih mempunyai 2 variabel yang tidak diketahui, yaitu [MEA] dan [DEA]. Namun kedua variabel ini dapat dihubungkan dari perbandingan konsentrasi pada persiapan pelarut yang menjadi variasi utama dalam penelitian ini, sehingga :

$$[\text{MEA}] : [\text{DEA}] = \frac{\% \text{ wt MEA}}{M_{r\text{MEA}}} : \frac{\% \text{ wt DEA}}{M_{r\text{DEA}}} \quad \text{B.6}$$

$$[\text{MEA}] = \frac{\left(\frac{\% \text{ wt MEA}}{M_{r\text{MEA}}}\right)}{\left(\frac{\% \text{ wt DEA}}{M_{r\text{DEA}}}\right)} \times [\text{DEA}] \quad \text{B.7}$$

Untuk memudahkan penurunan rumus selanjutnya, maka kita misalkan suatu bilang tak berdimensi α sehingga :

$$\alpha = \frac{\left(\frac{\% \text{ wt MEA}}{M_{r\text{MEA}}}\right)}{\left(\frac{\% \text{ wt DEA}}{M_{r\text{DEA}}}\right)} \quad \text{B.8}$$

$$[\text{MEA}] = \alpha [\text{DEA}] \quad \text{B.9}$$

Persamaan B.9 dapat disubstitusikan ke dalam persamaan B.5 :

$$[\text{OH}^-] = \sqrt{K_{b\text{MEA}} \alpha [\text{DEA}] + K_{b\text{DEA}} [\text{DEA}]} \quad \text{B.10}$$

$$(\text{OH}^-)^2 = \left(\sqrt{K_{b\text{MEA}} \alpha [\text{DEA}] + K_{b\text{DEA}} [\text{DEA}]} \right)^2 \quad \text{B.11}$$

$$(\text{OH}^-)^2 = K_{b\text{MEA}} \alpha [\text{DEA}] + K_{b\text{DEA}} [\text{DEA}] + 2 \sqrt{K_{b\text{MEA}} \alpha [\text{DEA}]} \sqrt{K_{b\text{DEA}} [\text{DEA}]} \quad \text{B.12}$$

$$(\text{OH}^-)^2 = [\text{DEA}] \left(K_{b\text{MEA}} \alpha + K_{b\text{DEA}} + 2 \sqrt{\alpha K_{b\text{MEA}} K_{b\text{DEA}}} \right) \quad \text{B.13}$$

$$[\text{DEA}] = \frac{(\text{OH}^-)^2}{\left(K_{b\text{MEA}} \alpha + K_{b\text{DEA}} + 2 \sqrt{\alpha K_{b\text{MEA}} K_{b\text{DEA}}} \right)} \quad \text{B.14}$$

Dari persamaan B.14 ini, kita dapat menghitung konsentrasi amina dalam pelarut dengan mengukur pH-nya. Konsentrasi CO_2 yang terlarut sendiri dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$[\text{CO}_2] = [\text{CO}_2]_{\text{MEA}} + [\text{CO}_2]_{\text{DEA}} \quad \text{B.15}$$

dengan $[\text{CO}_2]_{\text{MEA}}$ berarti konsentrasi CO_2 dalam MEA dan $[\text{CO}_2]_{\text{DEA}}$ berarti konsentrasi CO_2 yang terlarut dalam DEA. Masing-masing konsentrasi CO_2 ini dapat dihitung dengan mengurangi konsentrasi amina sebelum memasuki membran dengan konsentrasi amina setelah melewati membran :

$$[\text{CO}_2]_{\text{MEA}} = [\text{MEA}]_{\text{awal}} - [\text{MEA}]_{\text{akhir}} \quad \text{B. 16}$$

$$[\text{CO}_2]_{\text{DEA}} = [\text{DEA}]_{\text{awal}} - [\text{DEA}]_{\text{akhir}} \quad \text{B. 17}$$

B.2 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa (k_L)

Koefisien perpindahan massa (k_L) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$k_L = \frac{Q}{A} \ln \frac{C^* - C_0}{C^* - C_1} \quad \text{B. 18}$$

B.3 Perhitungan Kapasitas Penyerapan (k_{LA})

Kapasitas Penyerapan (k_{LA}) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$k_{LA} = k_L A \quad \text{B. 19}$$

B.4 Perhitungan Fluks Perpindahan Massa (J)

Fluks Perpindahan Massa (J) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$J = k_L [\text{CO}_2]_{\text{terlarut}} \quad \text{B. 20}$$

B.5 Perhitungan Bilangan Sherwood (Sh)

Bilangan Sherwood (Sh) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$Sh = k_l \frac{d_e}{D} \quad \text{B. 21}$$

di mana D ialah difusivitas CO_2 ke dalam pelarut pada suhu operasi. Difusivitas pada suhu tertentu ini dapat dihitung dengan mengetahui difusivitas CO_2 ke dalam pelarut pada suhu standar (acuan) :

$$\frac{D_1 T_1}{\mu_1} = \frac{D_2 T_2}{\mu_2} \quad \text{B. 22}$$

Viskositas (μ) dalam persamaan B.22 di atas memerlukan suatu perhitungan khusus dikarenakan pelarut yang digunakan dalam percobaan ini adalah campuran dua senyawa dengan viskositas berbeda. Sesuai pada referensi, viskositas campuran dua fluida dapat dihitung dengan 3 tahap berikut (Maples 2000) :

- a. Menghitung VBI (*Viscosity Blending Index*)

$$VBI_i = 14,534 \times \ln(\ln(\mu_i + 0,8)) + 10,975 \quad \text{B. 24}$$

- b. Menghitung VBN (*Viscosity Blending Number*)

$$VBN = \sum (w_i VBI_i) \quad \text{B. 25}$$

dengan w_i ialah fraksi massa dari senyawa dalam larutan.

- c. Menghitung Viskositas Campuran (μ)

$$\mu = e^{e^{\frac{(VBN-10,975)}{14,534}}} - 0,8 \quad \text{B. 26}$$

Sedangkan diameter ekuivalen, d_e dapat dihitung dengan persamaan berikut :

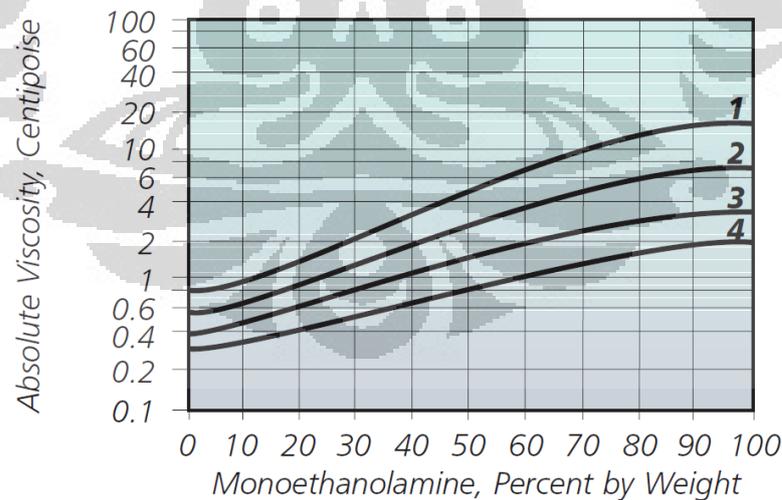
$$d_e = \frac{d_f}{\sqrt{1 - \varepsilon}} \quad \text{B. 27}$$

ε merupakan faktor kekosongyang dapat dihitung dengan persamaan berikut :

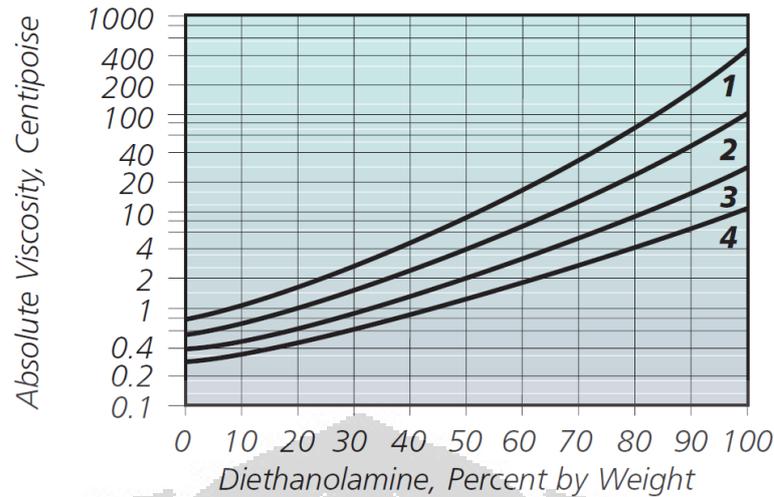
$$\varepsilon = 1 - N_{fibre} \left(\frac{d_f}{D_{i,modul}} \right)^2 \quad \text{B. 28}$$

B.5 Data yang Diperlukan dalam Perhitungan

Untuk menyelesaikan perhitungan di atas, diperlukan data-data berupa sifat-sifat fisika dari pelarut seperti berikut :



Gambar B.1 Viskositas MEA dengan indeks 1, 2, 3, dan 4 berurutan bermaksud viskositas diukur pada suhu 30 °C, 50 °C, 75 °C, dan 100 °C. (“*Ethanolamines*”, *The Dow Chemical Company*, Januari 2003)



Gambar B.2 Viskositas DEA dengan indeks 1, 2, 3, dan 4 berurutan bermaksud viskositas diukur pada suhu 30 °C, 50 °C, 75 °C, dan 100 °C. (“Ethanolamines”, The Dow Chemical Company, Januari 2003)

Karakteristik Membran :

- Panjang membran : 0,4 m
- Diameter dalam : 0,0013 m
- Diameter luar : 0,0015 m

Sifat-sifat lain yang berpengaruh dalam perhitungan :

- Difusivitas CO₂ ke dalam pelarut ≈ difusivitas CO₂ ke dalam air
- Difusivitas CO₂ ke dalam air : $1,96 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (pada suhu 25 °C)
- Massa jenis MEA : $1,012 \text{ g/cm}^3$
- Massa jenis DEA : $1,097 \text{ g/cm}^3$
- K_b MEA : $3,16 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$
- K_b DEA : $8,433 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$

B.5 Hasil Pengolahan Data

Berikut adalah hasil pengolahan data :

Tabel B.1 Hasil Pengolahan Data

No	Jumlah Serat	Pelarut (% berat)		CO ₂ terlarut (mol/L)	k_L (cm/s)	k_{LA} (cm ³ /s)	Fluks (mol/m ² s)	Bilangan Sherwood
		MEA	DEA					
1	20	0	10	0.064	0.0018	0.007	0.0012	55.5
2		2	8	0.090	0.0023	0.009	0.0020	68.8
3		4	6	0.137	0.0030	0.011	0.0041	90.4
4		6	4	0.161	0.0032	0.012	0.0051	94.9
5		8	2	0.172	0.0032	0.012	0.0055	97.4
6		10	0	0.146	0.0024	0.009	0.0036	74.3
7	30	0	10	0.067	0.0012	0.007	0.0008	29.9
8		2	8	0.117	0.0019	0.011	0.0023	47.0
9		4	6	0.161	0.0024	0.014	0.0039	59.2
10		6	4	0.179	0.0025	0.014	0.0045	61.6
11		8	2	0.180	0.0021	0.012	0.0039	53.0
12		10	0	0.187	0.0020	0.012	0.0038	50.0
13	40	0	10	0.083	0.0012	0.009	0.0010	25.9
14		2	8	0.126	0.0017	0.013	0.0022	37.4
15		4	6	0.176	0.0021	0.016	0.0037	45.0
16		6	4	0.204	0.0022	0.017	0.0045	46.9
17		8	2	0.210	0.0019	0.014	0.0040	41.0
18		10	0	0.187	0.0015	0.012	0.0029	32.5