



UNIVERSITAS INDONESIA

**ABSORPSI GAS CO₂ MELALUI KONTAKTOR MEMBRAN
SERAT BERONGGA MENGGUNAKAN LARUTAN
PENYERAP TUNGGAL DAN CAMPURAN SENYAWA
AMINA: PENGARUH LAJU ALIR CO₂**

SKRIPSI

SERVATIUS B. A.

0806456833

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JANUARI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ABSORPSI GAS CO₂ MELALUI KONTAKTOR MEMBRAN
SERAT BERONGGA MENGGUNAKAN LARUTAN
PENYERAP TUNGGAL DAN CAMPURAN SENYAWA
AMINA: PENGARUH LAJU ALIR CO₂**

SKRIPSI

SERVATIUS B. A.

0806456833

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

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JANUARI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Servatius B. A.

NPM : 0806456833

Tanda Tangan : 

Tanggal : 24 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Servatius B. A.


NPM : 0806456833


Program Studi : Teknik Kimia

Judul Skripsi : Absorpsi Gas CO₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Larutan Penyerap Tunggal Dan Campuran Senyawa Amina : Pengaruh Laju Alir CO₂

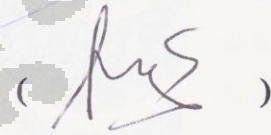
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc., Ph.D. ()

Penguji I : Dr. Ir. Nelson Saksono, M.T. ()

Penguji II : Ir. Yuliusman, M.Eng. ()

Penguji III : Ir. Mahmud Sudibandriyo, M.Sc., Ph.D. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Januari 2012

KATA PENGANTAR

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

1. Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
2. Prof. Ir. Sutrasno Kartohardjono M.Sc., Ph.D. selaku pembimbing skripsi yang selalu sabar dalam membimbing penyusunan skripsi ini.
3. Ir. Eva Fathul Karamah M.T., selaku pembimbing akademis selama menjalani masa kuliah di Teknik Kimia.
4. Orangtua terutama Mama yang telah berbahagia di surga. Mama selalu setia mendampingi di saat susah dan senang. Terima kasih juga untuk Papa yang telah bekerja keras selama ini dan selalu mendampingi di saat susah dan senang.
5. Tante Oni, Tante Din, Pakde Bambang, dan Bude Ine yang telah memberi dukungan moril dan materiil.
6. Pakde Acok dan Bude Puji yang selalu memberi semangat.
7. Kakak-kakak-ku tercinta : Mas Krisna, Ci' Ika, dan Mbak Dian yang selalu memberi dukungan moril.
8. Mbak Tik, pengasuh-ku dari kecil.
9. Sahabat-sahabat-ku dari masa kanak-kanak dan SMP : Delia Yosephine Dipasto dan Patricia Pur Dara Vicka.
10. Teman-teman Saboru Hito yang selalu memberi semangat dalam menjalani masa kuliah : Andre Riduan, Diana Augusta, Eldo Sularto Marbun, Fika Andriani, Shofa, Santoso, Destya Nilawati, Dini Asyifa, Pauline Leon Artha, dan Republik Daudi.

11. Teman-teman kelas pengolahan gas bumi : Ni Wayan Aira dan Taher Batubara.
12. Teman-teman *research group* : Antonius Eriek dan Julian Christopher, teman-teman seperjuangan dalam penelitian ini.
13. Teman-teman dekat-ku di Teknik Kimia UI : Elvina Fitriisia, Femmy Karima Yanuarta, Sari Pratiwi, Dipo Aji Santiko, dan Merry Dwi Anggraeni.
14. Mang Ijal, Mbak Tiwi, Mas Eko, dan Mas Taufik.
15. Teman-teman kelompok pabrik : Antonius Chrisnandy, Bramantyo, Guntur Eko Putro, Nadhila Andanis Zafhira. You are the best, Guys!
16. Teman-teman senasib seperjuangan Teknik Kimia 2008.
17. Teman-teman FIB-ku : Renny, Muthia, Sari, Vivi, dan Willy yang telah menjadi temanku selama menjalani masa kuliah di Universitas Indonesia.

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

Depok, 24 Januari 2012

Penulis

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

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

Nama : Servatius B. A.
NPM : 0806456833
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 Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Absorpsi Gas CO₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga
Menggunakan Larutan Penyerap Tunggal Dan Campuran Senyawa Amina :
Pengaruh Laju Alir CO₂**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan 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 : 24 Januari 2012

Yang menyatakan



(Servatius B. A.)

ABSTRAK

Nama : Servatius B. A.
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Absorpsi Gas CO₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Larutan Penyerap Tunggal dan Campuran Senyawa Amina : Pengaruh Laju Alir CO₂.

Gas CO₂ yang terkandung dalam gas alam dapat menurunkan nilai kalor pembakaran (*heating value*) gas alam. Selain sifatnya sebagai gas asam yang korosif, CO₂ juga dapat merusak sistem perpipaan pabrik karena dapat membeku pada suhu operasional yang sangat rendah. Proses *gas sweetening* adalah proses yang biasa dilakukan oleh pabrik pengolahan gas bumi untuk meminimalkan kandungan CO₂ dalam gas. Teknik konvensional yang biasa digunakan adalah kolom absorpsi. Namun, teknologi kolom absorpsi ini memerlukan energi yang besar dan kurang efektif. Saat ini, para peneliti sedang mengembangkan *hollow fiber membrane contactor* agar proses CO₂ removal berjalan lebih efektif. Pada penelitian ini digunakan pelarut tunggal diethanolamine (DEA) dan campuran senyawa amina monoethanolamine dan diethanolamine (MEA dan DEA). Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah variasi laju alir gas CO₂ sebagai gas umpan. Variasi lain yang dilakukan adalah jumlah serat dalam modul. Analisis efektifitas modul dilakukan dengan studi perpindahan massa. Besarnya perpindahan massa ditentukan dengan koefisien perpindahan massa. Hasil percobaan yang telah dilakukan menunjukkan bahwa kontaktor membran serat berongga adalah alat yang efektif dalam menyerap gas CO₂ pada laju alir gas umpan yang tinggi, jumlah serat dalam modul yang sedikit, dan menggunakan pelarut tunggal DEA.

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

ABSTRACT

Name : Servatius B. A.
Major : Chemical Engineering
Title : Absorption of Carbon dioxide Through Hollow Fiber Membrane Contactor by Using Single and Mixed Amine Absorbent: Effect of Carbon dioxide Flow Rate.

Carbon dioxide which is contained in natural gas can decrease the heating value of natural gas. Carbon dioxide is known as acid gas and it is corrosive. Carbon dioxide can also harm the piping system of the plant because it can freeze into solid phase at very low operational temperature. Gas sweetening process is a general process to minimize the carbon dioxide content in gas in natural gas processing industry. Absorption column is a conventional technique which is commonly used in CO₂ removal process. But, this technique needs energy in bulk and it is not effective. Now, researchers are developing hollow fiber membrane contactor (HFMC) technology in order to the CO₂ removal process runs more effectively. This research uses di-ethanolamine (DEA) as a single absorbent and mixed mono-ethanolamine (MEA) and DEA as a mixed absorbent. The variations in this research are variation of CO₂ flow rate as feed gas and variation of the number of fiber in module. The performance of HFMC is analyzed by study of mass transfer. The mass transfer in HFMC is showed by the result of mass transfer coefficient. The mass transfer coefficient indicates the effectiveness of the mass transfer happened in HFMC. The result shows that HFMC is effective equipment in the absorption process of CO₂ at high flow rate of feed gas and less number of fiber. It can be recommended for the CO₂ removal process. Besides, DEA as a single absorbent is good and effective in absorbing CO₂.

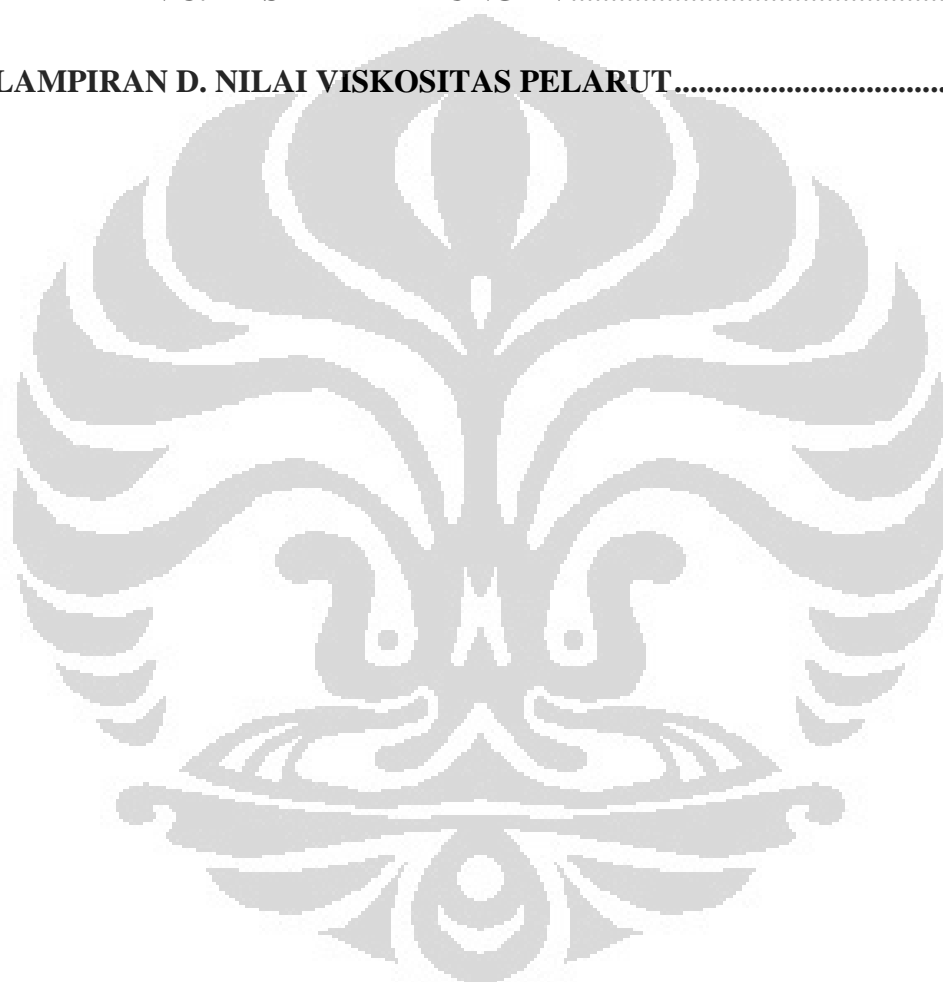
Keywords: carbon dioxide, hollow fiber membrane contactor, carbon dioxide flow rate, number of fiber, MEA, DEA.

DAFTAR ISI

COVER	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL.....	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Perumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Batasan Masalah.....	5
1.5. Sistematika Penulisan	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Sifat-sifat Fisik Dan Kimia Karbondioksida.....	6
2.2. Komposisi Gas CO ₂ Pada Sumur Gas Milik PT Conoco Philips Indonesia.....	

2.3. Proses Absorpsi CO ₂	7
2.4. Sistem Dua Komponen Pada Kelarutan Gas Dalam Liquid	8
2.5. Pelarut Senyawa Amina Pada Absorpsi CO ₂	9
2.6. Absorpsi Gas CO ₂ Pada Kolom Absorpsi Konvensional.....	13
2.7. Kontaktor Membran Serat Berongga	15
2.8. Membran PVC	16
2.9. Penelitian-penelitian Mengenai Absorpsi Gas CO ₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga	19
2.10. Studi Perpindahan Massa Pada Kontaktor Membran Serat Berongga.....	22
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1. Pendahuluan	26
3.2. Rancangan Penelitian	26
3.2.1. Studi Literatur	27
3.2.2. Experimental Set-Up	27
a. Alat.....	27
b. Bahan	29
c. Skema Alat.....	29
3.2.3. Uji Perpindahan Massa	30
3.2.4. Pengolahan Data	31
3.2.4.1. Koefisien Dan Fluks Perpindahan Massa	31
3.2.4.2. Korelasi Perpindahan Massa	33
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1. Studi Perpindahan Massa	34
4.1.1. Pengaruh Laju Alir Gas CO ₂ Terhadap Koefisien Perpindahan Massa (k_L) dan Fluks Perpindahan Massa (J)	35
4.1.2. Pengaruh Jumlah Serat Dalam Modul Terhadap Koefisien Perpindahan Massa (k_L) dan Fluks Perpindahan Massa (J).....	38
4.1.3. Pengaruh Jenis Pelarut Terhadap Koefisien Perpindahan Massa (k_L) dan Fluks Perpindahan Massa (J)	41
4.2. Persentase (%) Konsentrasi Gas CO ₂ Yang Terabsorpsi Ke Dalam Pelarut	46
4.3. Korelasi Perpindahan Massa	50

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN A. DATA PENELITIAN.....	57
LAMPIRAN B. CONTOH PERHITUNGAN	60
LAMPIRAN C. HASIL PERHITUNGAN	77
LAMPIRAN D. NILAI VISKOSITAS PELARUT.....	83



DAFTAR GAMBAR

- Gambar 2.1** Kelarutan beberapa jenis gas dalam air
- Gambar 2.2** Mekanisme absorpsi CO₂ ke dalam pelarut melalui membran
- Gambar 2.3** Proses absorpsi CO₂ pada kolom konvensional dengan simulasi Hysys
- Gambar 2.4** Kontaktor membran serat berongga
- Gambar 2.5** Hasil foto SEM untuk membran berpori
- Gambar 2.6** Monomer dan polimer PVC
- Gambar 2.7** Mekanisme perpindahan massa pada absorpsi CO₂ dengan tiga tahapan seri
- Gambar 3.1** Diagram alir penelitian
- Gambar 3.2** Papan kayu sebagai tempat unit operasi
- Gambar 3.3** Kontaktor membran serat berongga dengan jumlah serat 20, 30, dan 40
- Gambar 3.4** Tabung gas CO₂
- Gambar 3.5** Skema alat penelitian
- Gambar 4.1** Pengaruh variasi laju alir CO₂ terhadap k_L untuk pelarut DEA
- Gambar 4.2** Pengaruh variasi laju alir CO₂ terhadap J untuk pelarut DEA
- Gambar 4.3** Pengaruh variasi laju alir CO₂ terhadap k_L untuk pelarut MEA + DEA
- Gambar 4.4** Pengaruh variasi laju alir CO₂ terhadap J untuk pelarut MEA + DEA
- Gambar 4.5** Pengaruh variasi jumlah serat terhadap k_L untuk pelarut DEA pada setiap laju alir CO₂
- Gambar 4.6** Pengaruh variasi jumlah serat terhadap J untuk pelarut DEA pada setiap laju alir CO₂
- Gambar 4.7** Pengaruh variasi jumlah serat terhadap k_L untuk pelarut MEA + DEA pada setiap laju alir CO₂
- Gambar 4.8** Pengaruh variasi jumlah serat terhadap J untuk pelarut MEA + DEA pada setiap laju alir CO₂
- Gambar 4.9** Pengaruh jenis pelarut terhadap k_L untuk N = 20
- Gambar 4.10** Pengaruh jenis pelarut terhadap J untuk N = 20

Gambar 4.11 Pengaruh jenis pelarut terhadap k_L untuk $N = 30$

Gambar 4.12 Pengaruh jenis pelarut terhadap J untuk $N = 30$

Gambar 4.13 Pengaruh jenis pelarut terhadap k_L untuk $N = 40$

Gambar 4.14 Pengaruh jenis pelarut terhadap J untuk $N = 40$

Gambar 4.15 Persentase CO_2 yang terabsorpsi ke dalam Aquades untuk setiap jumlah serat

Gambar 4.16 Persentase CO_2 yang terabsorpsi ke dalam DEA untuk setiap jumlah serat

Gambar 4.17 Persentase CO_2 yang terabsorpsi ke dalam campuran MEA dan DEA untuk setiap jumlah serat

Gambar 4.18 Persentase CO_2 yang terabsorpsi ke dalam setiap absorben untuk jumlah serat 20

Gambar 4.19 Persentase CO_2 yang terabsorpsi ke dalam setiap absorben untuk jumlah serat 30

Gambar 4.20 Persentase CO_2 yang terabsorpsi ke dalam setiap absorben untuk jumlah serat 40

Gambar 4.21 Hubungan antara bilangan Sh dan Re untuk jumlah serat 20

Gambar 4.22 Hubungan antara bilangan Sh dan Re untuk jumlah serat 30

Gambar 4.23 Hubungan antara bilangan Sh dan Re untuk jumlah serat 40

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat fisika dan kimia CO₂

Tabel 2.2 Komposisi gas pada Sumur Dayung dan Sumpal milik PT Conoco Philips

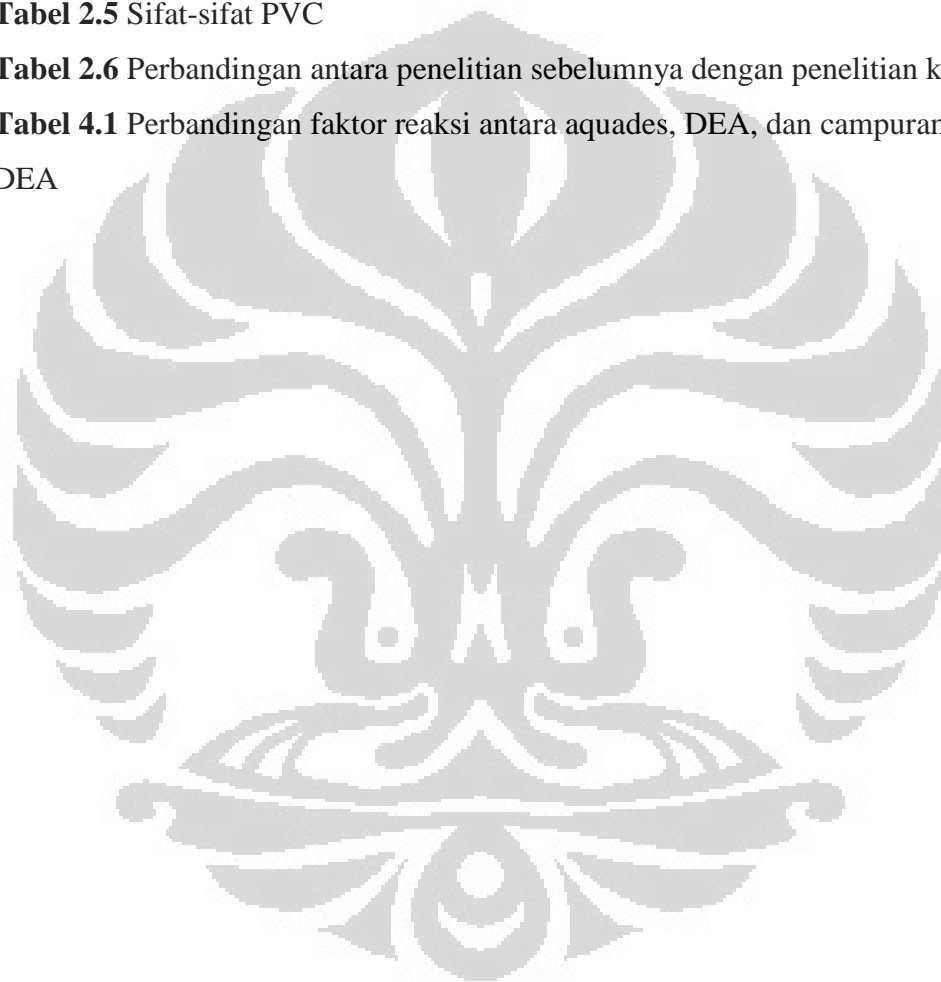
Tabel 2.3 Perbandingan sifat / karakteristik MEA, DEA, dan MDEA

Tabel 2.4 Sifat-sifat fisik MEA, DEA, dan MDEA

Tabel 2.5 Sifat-sifat PVC

Tabel 2.6 Perbandingan antara penelitian sebelumnya dengan penelitian kali ini

Tabel 4.1 Perbandingan faktor reaksi antara aquades, DEA, dan campuran MEA-DEA



DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
k_L	Koefisien / laju perpindahan massa	m/s
Q_L	Laju alir pelarut	m^3/s
A	Luas permukaan membran keseluruhan	m^2
C^*	Kelarutan gas CO_2 dalam absorben	mol/L
C_0	Konsentrasi awal CO_2 dalam absorben	mol/L
C_1	Konsentrasi akhir CO_2 dalam absorben	mol/L
n_f	Jumlah serat	-
d_f	Diameter serat	m
L	Panjang modul HFMM	m
$K_a CO_2$	Konstanta kesetimbangan CO_2	mol/L
T_0	Suhu awal	K
T^0	Suhu standard (ruang)	K
T_1	Suhu akhir	K
k_H	Konstanta Henry	-
P	Tekanan operasi	atm
J	Fluks perpindahan massa	$mol/(m^2.s)$
ΔC	Beda konsentrasi	mol/L
Sh	Bilangan Sherwood	-
Re	Bilangan Reynold	-
d_e	Diameter ekivalen	m
D	Difusivitas CO_2	m^2/s
ϵ	Faktor kekosongan	-
ρ	Massa jenis gas CO_2	kg/m^3
v	Kecepatan aliran gas	m/s
μ	Viskositas gas CO_2	cP

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Jumlah pemakaian gas di Indonesia sebagai sumber bahan bakar telah mengalami peningkatan sejak tahun 2008. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral RI (KESDM RI), konsumsi gas untuk domestik mengalami kenaikan dari 3,504.1 MMSCFD pada tahun 2007 menjadi 3,843.7 MMSCFD pada tahun 2008 (Prawira, 2008). Ekspor gas dari Indonesia ke luar negeri juga meningkat, dari sebesar 4,182.3 MMSCFD pada tahun 2007 menjadi 4,276.6 MMSCFD di tahun 2008 (Prawira, 2008).

Efisiensi pembakaran pada gas yang lebih tinggi daripada minyak bumi membuat banyak pihak lebih memilih gas alam sebagai sumber energi yang ramah lingkungan. Harga gas alam yang lebih stabil daripada minyak bumi dan cadangan gas yang melimpah juga membuat gas alam dipilih sebagai sumber energi. Karena alasan tersebut, gas alam kini menjadi salah satu bahan bakar favorit, dan terjadilah kenaikan konsumsi gas. Untuk menyikapi hal tersebut, pengolahan gas alam perlu dilakukan secara maksimal dan efektif agar dapat meningkatkan kualitas produk gas Indonesia di mata dunia dan gas dapat dijual dengan harga yang terjangkau oleh seluruh masyarakat Indonesia.

Karbondioksida (CO_2) adalah salah satu senyawa pengotor yang terkandung dalam gas alam. Komposisi CO_2 yang terkandung dalam gas alam pada sumur-sumur gas di beberapa daerah di Indonesia cukup tinggi, terlebih lagi di blok Natuna (70% CO_2). Adanya kandungan CO_2 dalam gas alam dapat menurunkan nilai kalor pembakaran (*heating value*), sehingga kualitas produk yang dihasilkan pun kurang baik. Sifat CO_2 sebagai gas asam dan membeku pada suhu operasional yang sangat rendah juga dapat merusak peralatan pabrik dan sistem perpipaan (Dortmundt dan Kishore, 1999). Akibatnya, biaya operasional pabrik menjadi bertambah dan berdampak pada harga jual gas. Oleh karena itu, peningkatan kualitas gas alam dengan proses *CO₂ removal* perlu dilakukan secara maksimal dan se-efektif mungkin.

Beberapa teknologi yang diaplikasikan pada proses *CO₂ removal* adalah

separasi membran, adsorpsi, distilasi kriogenik, dan absorpsi. Separasi membran membutuhkan *pressure drop* yang tinggi dan selektivitas-nya terhadap CO₂ buruk. Adsorpsi membutuhkan suhu operasi yang tinggi dan kurang efektif dalam menyerap gas CO₂. Teknologi distilasi kriogenik juga sudah mulai ditinggalkan karena membutuhkan kondisi tekanan operasi yang tinggi. Selain itu, teknologi ini membutuhkan biaya yang besar. Dari semua teknologi yang telah disebutkan, absorpsi adalah teknologi yang paling efektif dalam proses pemisahan CO₂ dari gas alam. Selain karena proses nya yang mudah, absorpsi dapat dikombinasikan dengan peralatan lain dalam pabrik pengolahan gas bumi.

Salah satu penerapan prinsip absorpsi yang sering digunakan pada skala industri adalah dengan menggunakan teknologi kolom absorpsi konvensional dengan pelarut senyawa amina. Pelarut (absorben) senyawa amina yang dimaksud adalah monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA), methyldiethanolamine (MDEA), atau 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP). Namun, kolom absorpsi konvensional ini memerlukan energi yang besar dan pengoperasian alat ini seringkali bermasalah dengan terjadinya *flooding*, *loading*, *channeling*, *foaming*, dan *entraining* (Al-Marzouqi et.al, 2007; Wang et.al, 2003). Biaya operasional pada penggunaan kolom konvensional juga tinggi dan proses absorpsi CO₂ yang terjadi pada kolom kurang efisien sehingga diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk mengatasi permasalahan tersebut (Al-Marzouqi et.al, 2007; Modigell et.al, 2007).

Hollow fiber membrane contactor / module (HFMM) adalah teknologi yang sedang dikembangkan untuk proses *CO₂ removal*. Proses absorpsi CO₂ dilakukan dengan menggunakan pelarut, seperti air dan NaOH (Rangwala, 1995). Selain itu, senyawa amina seperti MEA, DEA, dan MDEA juga dapat digunakan sebagai absorben pada HFMM (Jian-gang et.al, 2009; Kim dan Yang, 2000). Pelarut yang digunakan pada modul dapat berupa pelarut tunggal maupun campuran. Pada penelitian yang dilakukan oleh Lu dkk., pelarut yang digunakan adalah campuran *aqueous glycine salt* (GLY) dan monoethanolamine (MEA) (Jian-gang et.al, 2009). Pelarut campuran MDEA/MEA juga digunakan sebagai absorben pada proses absorpsi gas CO₂ pada penelitian Yanwen (Gong et.al, 2006).

Kontaktor membran serat berongga / HFMM merupakan alternatif proses

absorpsi CO₂ dengan potensi yang menguntungkan dari sisi ekonomi dan efektifitas operasional. HFMM memiliki ukuran yang lebih kecil dan konsumsi energi yang lebih rendah dibandingkan kolom absorpsi konvensional. Pelarut yang digunakan dapat di-*recycle* dan diregenerasi sehingga tidak boros (Gabelman dan Hwang, 1999). Absorpsi CO₂ pada kontaktor membran lebih efektif karena luas permukaan kontak gas-cair yang lebih besar daripada kolom absorpsi konvensional (Li dan Chen, 2005). *Scale up* juga dapat dilakukan dengan mudah karena modul fleksibel untuk disusun dan laju alir gas dan pelarut dapat divariasikan, sehingga berbagai masalah seperti *flooding*, *foaming*, *chanelling*, dan *entraining* dapat dicegah.

Penelitian kali ini dilakukan dengan variasi laju alir gas CO₂ sebagai gas umpan (*feed gas*) untuk meningkatkan daya absorpsi CO₂ pada kontaktor membran serat berongga. Salah satu kelemahan dari modul ini adalah bentuk aliran gas yang laminar, dimana di dalam modul juga terdapat tahanan membran yang dapat meningkatkan tahanan perpindahan massa (Li dan Chen, 2005). Hal ini menyebabkan koefisien perpindahan massa yang dihasilkan menjadi kurang optimal. Peningkatan kecepatan linier akan meningkatkan turbulensi aliran sehingga arus Eddy yang terjadi juga semakin besar (Bird, 1960; Treybal, 1981). Oleh karena itu, penelitian ini akan dilakukan dengan variasi laju alir gas CO₂, dimana laju alir gas akan semakin meningkat. Pelarut (absorben) yang digunakan dalam penelitian ini adalah DEA sebagai absorben tunggal dan campuran MEA dan DEA sebagai absorben campuran senyawa amina. Pengukuran dilakukan terhadap pH sampel dengan menggunakan pH-meter. Hasil pengukuran pH tersebut digunakan untuk menghitung konsentrasi CO₂ yang terlarut dalam absorben pada kondisi awal (C₀) dan akhir (C₁). Kemudian, nilai C₀ dan C₁ tersebut digunakan untuk menentukan koefisien (k_L) dan fluks (J) perpindahan massa. Dari nilai koefisien dan fluks perpindahan massa, maka efektifitas modul dapat disimpulkan.

Laju alir CO₂ yang semakin tinggi diharapkan dapat membuat laju absorpsi CO₂ menjadi semakin besar. Hal ini karena semakin besar laju alir gas CO₂, maka jumlah (kuantitas) gas CO₂ yang terdistribusi dalam modul semakin banyak. Hal ini menyebabkan CO₂ yang berdifusi ke dalam membran akan semakin banyak,

sehingga nilai koefisien dan fluks perpindahan massa akan meningkat. Laju alir gas CO₂ yang semakin tinggi juga akan meningkatkan turbulensi aliran gas dalam modul sehingga arus Eddy yang terjadi juga akan semakin besar. Arus Eddy ini akan memperkecil hambatan perpindahan massa sehingga koefisien perpindahan massa yang terjadi akan meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa operasi tersebut berjalan efektif dan efisien.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh beberapa ahli, proses absorpsi CO₂ dengan pelarut campuran senyawa amina pada kontaktor membran serat berongga berjalan lebih efektif daripada absorpsi pada kolom konvensional. Untuk lebih mengoptimalkan proses absorpsi CO₂ pada HFMM diperlukan kondisi operasi yang tepat. Oleh karena itu, pada penelitian kali ini akan dilakukan variasi laju alir gas CO₂ sebagai gas umpan (*feed gas*) untuk meningkatkan daya absorpsi CO₂ pada kontaktor membran serat berongga. Rumusan masalah yang dapat diambil dari persoalan ini adalah:

Bagaimana pengaruh variasi laju alir CO₂ terhadap koefisien dan fluks perpindahan massa pada proses absorpsi CO₂ dalam kontaktor membran serat berongga dengan menggunakan absorben tunggal (DEA) dan campuran senyawa amina (MEA dan DEA)?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- Menganalisis efek variasi laju alir gas CO₂ sebagai gas umpan terhadap koefisien dan fluks perpindahan massa pada proses absorpsi CO₂ dalam modul kontaktor membran serat berongga.
- Menganalisis efek variasi jumlah serat dalam modul terhadap koefisien dan fluks perpindahan massa pada proses absorpsi CO₂ dalam modul kontaktor membran serat berongga.
- Menentukan apakah proses absorpsi gas CO₂ ke dalam absorben tunggal (DEA) dan campuran (MEA dan DEA) senyawa amina yang terjadi pada kontaktor membran serat berongga efektif atau tidak.

1.4. Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi dengan:

- A) Menggunakan kontaktor membran serat berongga dengan serat yang terbuat dari bahan PVC (poli vinil klorida) sebagai kontaktor gas-cair, dengan diameter membran tetap.
- B) Menggunakan gas umpan dengan komposisi CO₂ murni.
- C) Menggunakan absorben senyawa amina, yaitu MEA dan DEA.

1.5. Sistematika Penulisan

- BAB 1. PENDAHULUAN: berisi latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.
- BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA: berisi dasar teori yang digunakan untuk menjelaskan masalah dan penyelesaian masalah.
- BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN: berisi tentang skema alat, prosedur penelitian, metode pengambilan data, dan pengolahan data.
- BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN: berisi tentang pembahasan hasil penelitian dan analisis terhadap hasil penelitian tersebut.
- BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN: berisi tentang kesimpulan yang diambil dari hasil percobaan yang dilakukan, terkait dengan tujuan penelitian, dan saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sifat-sifat Fisik Dan Kimia Karbondioksida

Karbondioksida (CO₂) adalah senyawa yang disebut-sebut sebagai penyebab terjadinya *global warming* (Williams, 2002). Tidak hanya menyebabkan *global warming*, karbondioksida juga dianggap merugikan pada industri pengolahan gas alam karena sifatnya yang korosif dan memadat pada suhu operasional yang sangat rendah. Hal ini dapat mengakibatkan kerusakan pada peralatan dan sistem perpipaan pabrik (Dortmundt dan Kishore, 1999). Selain itu, adanya kandungan CO₂ pada gas alam dapat menurunkan *heating value* dari gas alam tersebut. Jadi, karbondioksida dianggap sebagai senyawa yang kurang baik bagi sebagian besar orang.

Seperti senyawa lainnya, karbondioksida memiliki beberapa sifat fisik dan kimia yang penting untuk diketahui. Gas CO₂ tidak berwarna, tidak berbau, dan bersifat asam. Tabel 2.1 adalah tabel yang menjelaskan sifat-sifat fisika dan kimia dari karbondioksida:

Tabel 2.1 Sifat fisika dan kimia CO₂ (Perry, 1997)

No	Sifat	Keterangan	
1	Titik didih (Boiling Point)	Subl. -78.5°C	Sifat Fisika
2	Titik leleh (Melting Point)	-56.6°C	
3	Densitas (wujud gas)	1.873 kg/m ³	
4	Temperatur kritis	38°C	
5	Tekanan kritis	0.6 kg/cm ² .G	
6	Kelarutan dalam air	1.45 g/L	
7	Keasaman (pKa)	6.35 & 10.33	
8	Viskositas	0.07 cp pada -78°C	
9	Berat molekul	44.01 gr/mol	Sifat Kimia
10	Momen dipol	Nol	
11	Bentuk molekul	Linear	
12	Kereaktifan	Tidak reaktif / Inflammable	

2.2. Komposisi Gas CO₂ Pada Sumur Gas Milik PT Conoco Philips Indonesia

Rata-rata kandungan gas CO₂ dalam gas alam Indonesia cukup tinggi, yaitu sekitar 30 %, terlebih lagi di blok natuna, yaitu 70 %. Tabel 2.2 di bawah ini adalah tabel contoh komposisi gas alam pada sumur milik PT Conoco Philips:

Tabel 2.2 Komposisi gas pada Sumur Dayung dan Sumpal milik PT Conoco Philips

Sumber: Conoco Philips Indonesia, Grissik

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 %

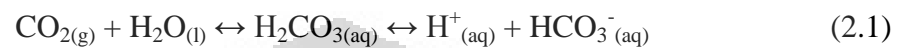
2.3. Proses Absorpsi CO₂

Absorpsi gas adalah operasi perpindahan massa dimana gas / campuran gas dikontakkan dengan cairan sehingga terjadi pelarutan satu atau lebih komponen-komponen gas ke dalam cairan. Mekanisme perpindahan massa yang terjadi sebagian besar dikontrol oleh laju difusi, dimana laju difusi tersebut dipengaruhi oleh perbedaan konsentrasi fasa gas dengan fasa cair (Treybal, 1981).

Terdapat dua jenis absorpsi, yaitu absorpsi fisika dan absorpsi kimia. Proses perpindahan massa pada absorpsi kimia terjadi melalui reaksi kimia. Absorpsi fisika terjadi karena adanya beda konsentrasi. Pada absorpsi fisika, energi yang dibutuhkan untuk regenerasi larutan jauh lebih rendah daripada absorpsi kimia. Hal ini karena pada absorpsi fisika tidak diperlukan penambahan energi untuk regenerasi larutan, cukup menurunkan tekanan sebagai *driving force* (gaya dorong).

Aplikasi dari absorpsi fisika adalah proses absorpsi gas CO₂ ke dalam air,

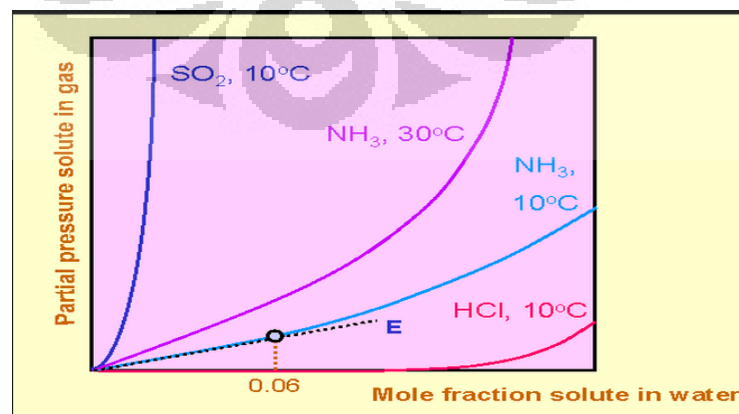
dimana CO₂ akan berdifusi ke dalam air tanpa terjadi reaksi kimia. Absorpsi CO₂ ke dalam air adalah proses yang dijadikan sebagai pembanding dalam menggunakan pelarut lain sebagai absorben. Pada dasarnya, CO₂ tetap bereaksi dengan air, dimana reaksi yang terjadi adalah reaksi kesetimbangan dan konstanta kesetimbangan yang terjadi sangat kecil. Oleh karena itu, reaksi kimia antara CO₂ dan air dapat diabaikan. Reaksi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut (Kim dan Yang, 2000):



Absorpsi gas CO₂ ke dalam pelarut senyawa amina adalah absorpsi kimia, dimana terjadi reaksi kimia antara CO₂ dengan senyawa amina (Shuo et.al, 1996). Reaksi tersebut merupakan mekanisme *Zwitter-ion* yang akan dijelaskan kemudian pada subbab berikutnya mengenai pelarut senyawa amina pada absorpsi CO₂. MEA, DEA, dan MDEA adalah pelarut (absorben) yang biasa digunakan untuk meng-absorb CO₂, dimana pelarut-pelarut tersebut dapat diregenerasi kembali.

2.4. Sistem Dua Komponen Pada Kelarutan Gas Dalam Liquid

Pada suhu tertentu, konsentrasi kelarutan gas dalam liquid akan berbanding lurus dengan tekanan. Gas dan liquid yang berbeda-beda menghasilkan kurva kelarutan yang berbeda pula (Treybal, 1981). Hubungan antara tekanan dan kelarutan gas dalam liquid dapat digambarkan dalam kurva kelarutan beberapa jenis gas dalam air pada Gambar 2.1:



Gambar 2.1 Kelarutan beberapa jenis gas dalam air

Sumber: www.separationprocesses.com/Absorption/Fig111 (diakses 12 Mei 2011)

2.5. Pelarut Senyawa Amina Pada Absorpsi CO₂

Senyawa amina adalah pelarut (absorben) yang paling banyak digunakan pada proses absorpsi CO₂, karena senyawa amina dapat bereaksi dengan CO₂ membentuk senyawa kompleks (ion karbamat) dengan ikatan kimia yang lemah (Wang et.al, 2003). Ikatan kimia ini dapat dengan mudah terputus dengan pemanasan (*mild heating*) sehingga regenerasi absorben (senyawa amina) dapat dengan mudah terjadi (Wang et.al, 2003). Selain senyawa amina, pelarut yang dapat digunakan pada proses absorpsi CO₂ pada kontaktor membran serat berongga adalah air dan NaOH (Rangwala, 1995). Namun, senyawa tersebut tidak se-efektif senyawa amina dalam menyerap CO₂. Sehingga dapat dikatakan bahwa senyawa amina adalah pelarut yang efisien dan efektif pada proses operasional absorpsi CO₂.

Senyawa amina yang paling sering digunakan sebagai absorben pada absorpsi CO₂ adalah MEA (monoethanolamine), DEA (diethanolamine), dan MDEA (methyldiethanolamine). Menurut Astarita, Barth, dan Yu, ketiga senyawa amina tersebut memiliki kemampuan menyerap CO₂ yang baik, laju absorpsi yang cepat, dan mudah untuk diregenerasi (Barth et.al, 1984; Astarita et.al, 1983; Yu dan Astarita, 1985). Tabel 2.3 menunjukkan perbandingan sifat / karakteristik dari MEA, DEA, dan MDEA:

Tabel 2.3 Perbandingan sifat / karakteristik MEA, DEA, dan MDEA (Jian-gang, 2009; Wang et.al, 2003; Kim dan Yang, 2000)

No	Sifat / Karakteristik		
	MEA	DEA	MDEA
1	Senyawa amina yang paling ekonomis	Harganya tidak terlalu mahal	Harganya paling mahal diantara MEA dan DEA
2	Paling korosif diantara DEA dan MDEA	Bersifat korosif	Tidak korosif
3	Kurang efektif dalam menyerap CO ₂ diantara DEA dan MDEA	Paling efektif dalam menyerap CO ₂	Reaksi dengan CO ₂ berjalan lambat sehingga kurang efektif

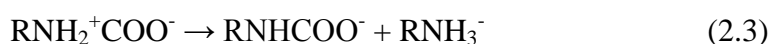
Sedangkan, Tabel 2.4 menunjukkan sifat-sifat fisik MEA, DEA, dan MDEA:

Tabel 2.4 Sifat-sifat fisik MEA, DEA, dan MDEA (Huntsman, 2007; Frauenkron, 2002; Tartar, 1940)

Senyawa Amina	Tekanan Uap (20°C)	Massa Jenis (kg/m ³)
MEA	25 Pa	1012
DEA	0.01 Pa	1090
MDEA	1 Pa	1043

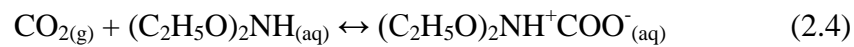
Pelarut yang digunakan pada proses absorpsi CO₂ dapat berupa pelarut tunggal (*single*) maupun campuran. Pada absorpsi CO₂ yang dilakukan selama ini, baik pada kolom konvensional maupun kontaktor membran, pelarut yang biasanya digunakan adalah pelarut tunggal (hanya MEA, DEA, atau MDEA saja). Lu dkk. melakukan penelitian absorpsi CO₂ pada kontaktor membran dengan pelarut campuran senyawa amina, yaitu *glycine salt* (GLY) dan MEA (Jian-gang, 2009). Yanwen Gong juga menggunakan pelarut campuran MDEA/MEA pada penelitian absorpsi CO₂ pada kontaktor membran (Gong et.al, 2006). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelarut campuran senyawa amina lebih baik dalam mengabsorpsi gas CO₂ daripada pelarut amina tunggal. Penelitian serupa juga dilakukan oleh Su dkk., dimana CO₂ yang diserap akan semakin banyak dengan peningkatan konsentrasi absorben (piperazine-alkanolamine) (Lin et.al, 2009). Su juga menambahkan informasi bahwa fluks absorpsi CO₂ meningkat seiring dengan peningkatan laju alir gas CO₂ (Lin et.al, 2009). Hal ini mengindikasikan bahwa absorben campuran senyawa amina adalah absorben yang baik pada proses absorpsi CO₂.

Absorpsi gas CO₂ dengan pelarut senyawa amina adalah absorpsi kimia yang melibatkan reaksi antara CO₂ yang merupakan salah satu senyawa asam lemah dengan MEA atau DEA yang bersifat basa lemah. Mekanisme *zwitter-ion* telah diterima secara umum sebagai mekanisme reaksi antara gas CO₂ dengan amina primer (MEA) maupun sekunder (DEA). Reaksi yang terjadi antara CO₂ dengan senyawa amina dapat dituliskan sebagai berikut (Kim dan Yang, 2000):



Mekanisme reaksi tersebut terdiri dari 2 tahap. Berikut adalah contoh reaksi antara CO₂ dengan DEA:

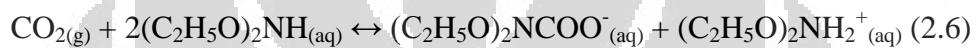
1. Pada langkah awal, CO₂ bereaksi dengan DEA membentuk ion zwitter:



2. Kemudian, ion zwitter yang terbentuk akan bereaksi kembali dengan DEA membentuk ion karbamat yang mengandung CO₂:

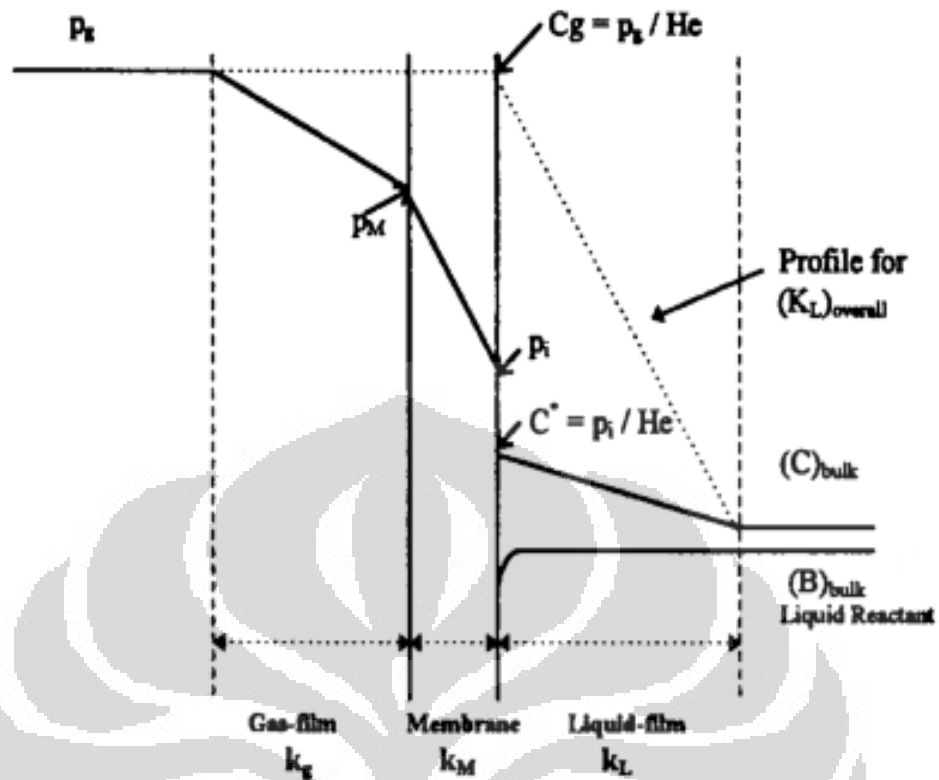


Secara keseluruhan, mekanisme reaksi antara CO₂ dengan DEA adalah:



Persamaan reaksi tersebut menyatakan bahwa konsentrasi CO₂ yang terlarut merupakan setengah dari konsentrasi DEA yang bereaksi membentuk ion karbamat.

Absorpsi CO₂ pada membran didasarkan atas terjadinya kontak antara fasa gas dan cair melalui membran mikroporous yang hidrofobik. Membran ini membentuk penghalang antara fasa gas dan cair yang dapat menimbulkan perpindahan massa antara dua fasa tanpa terjadinya dispersi antara satu fasa terhadap fasa yang lain. Fasa gas biasanya mengisi pori-pori membran dan mengalami kontak dengan fasa cair yang berada pada sisi lain dari membran. Fasa cair harus memiliki tekanan yang lebih besar dibandingkan dengan fasa gas untuk mencegah terjadinya dispersi gelembung-gelembung gas ke dalam cairan. Gambar 2.2 pada halaman berikutnya adalah mekanisme proses absorpsi gas CO₂ ke dalam pelarut melalui membran.



Gambar 2.2 Mekanisme absorpsi CO₂ ke dalam pelarut melalui membran (Rangwala, 1995)

Saat gas CO₂ mendekati interfasa cair, gas CO₂ akan larut dan bereaksi dengan DEA membentuk ion karbamat. Ion karbamat akan berdifusi ke dalam fasa cair, sedangkan konsentrasi DEA pada interfasa cair akan turun karena bereaksi dengan gas CO₂. Hal ini menyebabkan terjadinya difusi pelarut DEA dari cairan ke interfasa cair. Daerah reaksi terdapat diantara lapisan tipis cairan dengan *bulk* cairan.

Penelitian kali ini menggunakan pelarut tunggal (DEA) dan campuran MEA dan DEA dengan beberapa pertimbangan. DEA dan MDEA adalah absorben yang efektif dalam meng-absorb CO₂ karena kereaktifannya dengan CO₂. Namun, harga MDEA yang beredar di pasaran paling mahal diantara MEA dan DEA. Oleh karena itu, untuk pelarut campuran dengan DEA digunakan MEA. MEA adalah senyawa amina yang paling ekonomis diantara DEA dan MDEA. Namun, MEA memiliki kelemahan yaitu memiliki sifat paling korosif diantara DEA dan MDEA. Berikut adalah pertimbangan-pertimbangan lainnya yang didasarkan pada sifat-sifat MEA dan DEA yang membuatnya dapat dijadikan sebagai absorben (Bullin

dan Polasek, 2001):

1. Konsentrasi larutan yang tinggi (hingga 50-55 wt%)
2. High acid gas loading
3. Laju degradasi yang rendah
4. Tekanan uap rendah
5. Harga yang ekonomis

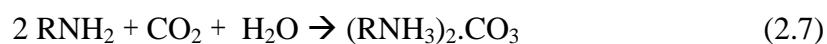
Pemilihan MEA dan DEA pada penelitian ini juga didasarkan pada pertimbangan syarat-syarat yang harus dimiliki oleh suatu pelarut (Treybal, 1981):

1. Kelarutan gas yang tinggi
2. Pelarut memiliki tekanan uap yang rendah
3. Harga pelarut yang murah dan mudah didapatkan
4. Viskositas yang rendah
5. Sebaiknya tidak beracun, tidak mudah terbakar, dan stabil.

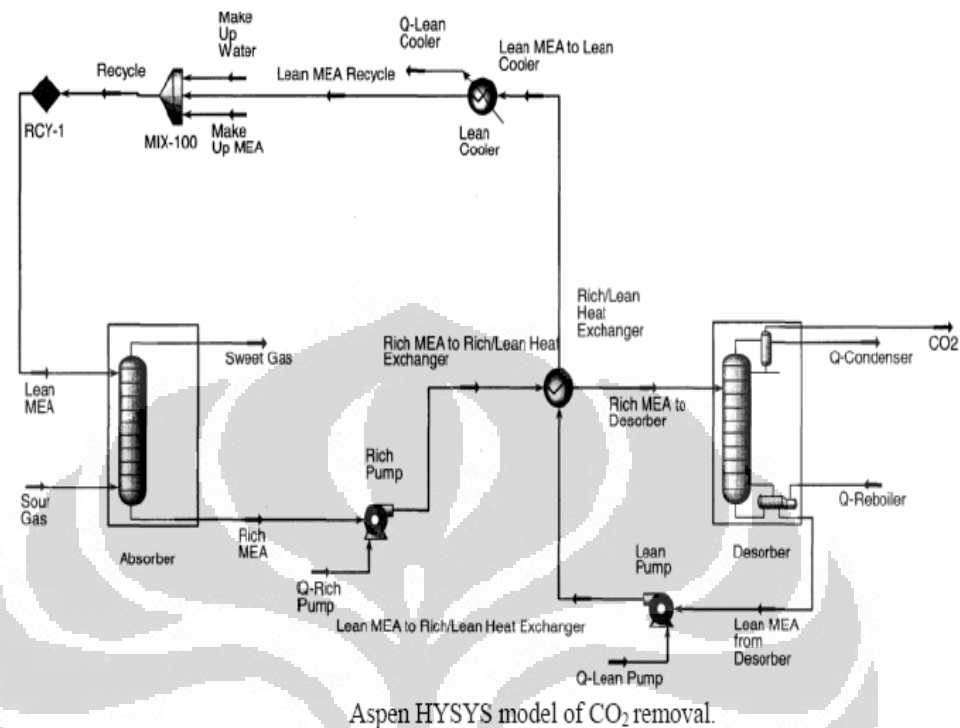
Pada penelitian ini, komposisi pelarut DEA yang digunakan sebagai pelarut tunggal adalah 17% volume dengan komposisi aquades 83% volume. Sedangkan, komposisi antara MEA, DEA, dan aquades sebagai pelarut campuran adalah 8%: 17%: 75% (dalam % volume). Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, komposisi MEA yang digunakan sebagai absorben pada proses absorpsi gas CO₂ adalah 15-20%, sedangkan untuk DEA, komposisi yang digunakan adalah 20-30% (Jian-gang et.al, 2009; Kartohardjono, 2007). Berdasarkan hasil penelitian, komposisi MEA yang terletak antara 15-20% volume dan DEA yang terletak antara 20-30% volume adalah kisaran komposisi dimana kedua absorben tersebut efektif dalam menyerap gas CO₂ (Jian-gang et.al, 2009; Kartohardjono, 2007).

2.6. Absorpsi Gas CO₂ Pada Kolom Absorpsi Konvensional

Salah satu teknik *CO₂ removal* dari gas alam (*gas sweetening*) yang dilakukan di industri pengolahan gas alam adalah absorpsi dengan menggunakan absorben pelarut senyawa amina pada kolom absorber. Saat terjadi kontak antara larutan amina dan gas CO₂, maka akan timbul reaksi berikut:



Gambar 2.3 di bawah ini menunjukkan skema simulasi proses absorpsi CO₂ pada kolom absorpsi konvensional yang dijalankan dengan program Hysys:



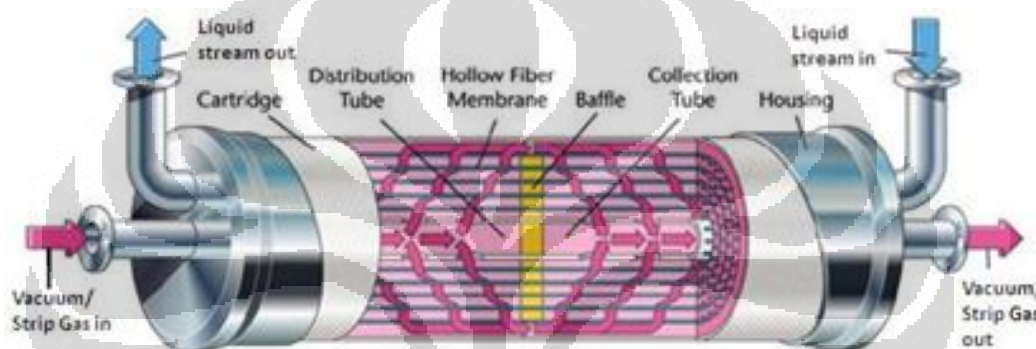
Gambar 2.3 Proses absorpsi CO₂ pada kolom konvensional dengan simulasi Hysys
 Sumber: www.webwormcpt.blogspot.com/hysys-simulation-of-mea-based-co2.html
 (Diakses 12 Mei 2011)

Gambar 2.3 adalah proses penghilangan gas CO₂ yang disimulasikan dengan program Hysys. Proses pemisahan gas CO₂ terjadi di kolom absorber, dimana gas alam mengalir dari bagian bawah kolom, sementara larutan MEA (amina) yang bertindak sebagai absorben mengalir melalui bagian atas kolom. Terjadi kontak antara gas dan larutan MEA di dalam kolom yang memungkinkan terjadinya perpindahan gas CO₂ dari gas alam ke larutan MEA. Selanjutnya, larutan MEA yang telah menyerap gas CO₂ ini akan keluar melalui bagian bawah kolom, dan dikirim ke kolom regenerasi untuk melepaskan gas CO₂ yang terikat.

Kolom konvensional ini memerlukan energi yang cukup besar. Hingga saat ini, pelarut yang digunakan pada kolom absorpsi konvensional adalah pelarut tunggal, yaitu hanya menggunakan MEA, DEA, atau MDEA saja sebagai absorben. Biaya operasional pada penggunaan kolom konvensional juga tinggi dan proses CO₂ removal yang terjadi pada kolom kurang efisien.

2.7. Kontaktor Membran Serat Berongga

Kontaktor membran serat berongga merupakan kontaktor membran yang di dalamnya terdapat *hollow fiber* (serat berongga) yang berfungsi sebagai pemisah antara fasa yang satu dengan fasa yang lainnya (fasa gas CO₂ dengan fasa cair pelarut MEA / DEA). Struktur serat di dalam modul yang asimetrik memiliki diameter dalam sekitar 0.8 mm (0.0315 in) dan diameter luar sekitar 1.5 mm (0.05906 in). HFMM mempunyai diameter dalam sebesar 2.4 cm (0.94488 in) dengan panjang kurang lebih 40 cm. Dimensi kontaktor membran serat berongga ditunjukkan dengan Gambar 2.4 di bawah ini:



Gambar 2.4 Kontaktor membran serat berongga (Gabelman dan Hwang, 1999)

Fungsi utama membran dalam kontaktor membran serat berongga adalah menciptakan luas permukaan kontak yang sangat besar di dalam modul sehingga proses perpindahan massa yang terjadi akan lebih efektif. Selain itu, membran serat berongga juga digunakan untuk mengontakkan fasa gas dan cair dengan kombinasi efek tegangan permukaan dan perbedaan tekanan pada tiap fasa. Selongsong yang digunakan terbuat dari bahan akrilik. Sedangkan, membran yang digunakan pada penelitian kali ini terbuat dari bahan PVC (*polivinil chloride*).

Keunikan kontaktor membran serat berongga yaitu menggunakan membran yang tidak selektif dan non-dispersif sehingga tidak mempengaruhi koefisien partisi dimana perbedaan konsentrasi merupakan *driving force* yang paling besar pengaruhnya dalam separasi dibandingkan perbedaan tekanan. Oleh karena itu, hanya diperlukan perbedaan tekanan yang kecil pada membran untuk membuat *interface* gas-cair tidak bergerak pada mulut pori.

Berikut adalah beberapa kelebihan yang dimiliki oleh kontaktor membran serat berongga dibandingkan dengan teknologi separasi konvensional (Gabelman

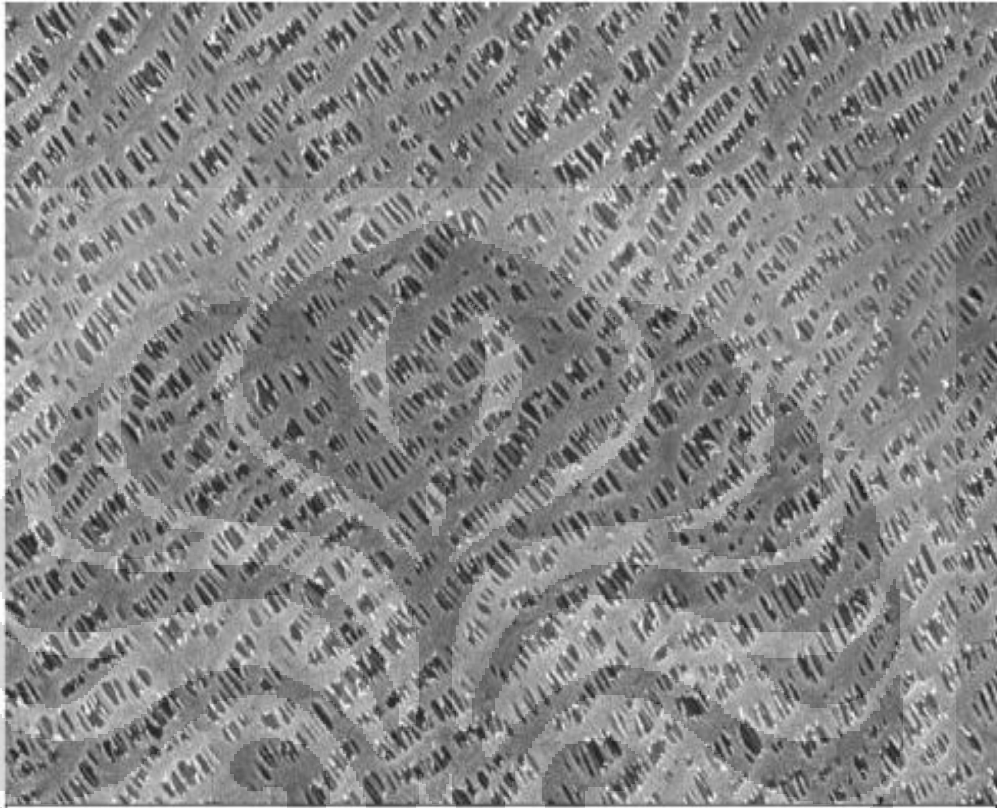
dan Hwang, 1999):

1. Sistem kontak yang bersifat non-dispersif memudahkan kontrol terpisah dari laju alir fasa gas dan cairan.
2. Tidak diperlukan adanya perbedaan densitas antar fluida.
3. Tidak terjadi *foaming* saat beroperasi karena tidak ada dispersi antar fluida.
4. Luas permukaan yang ada tidak mempengaruhi variasi laju alir karena kedua aliran tidak bergantung satu sama lain.
5. Efisiensi yang diperoleh lebih tinggi (dengan pengukuran *HTU-Height of Transfer Unit* yang rendah).
6. Luas permukaan kontak yang lebih besar daripada separasi konvensional, kira-kira dapat memberikan luas permukaan 30 kali lebih besar daripada *gas absorber* dan 500 kali lebih besar daripada kolom ekstraksi cair-cair.
7. Tidak terjadi pemborosan pelarut karena pelarut dapat diregenerasi sehingga lebih efisien dalam pemanfaatan pelarut.
8. Kontakor membran juga dapat meningkatkan batas konversi kesetimbangan reaksi kimia dengan proses sirkulasi kandungan reaktor melalui kontakor menggunakan pelarut ekstraksi atau gas desorpsi produk dapat diambil sehingga reaksi kesetimbangan akan bergeser ke arah kanan (produk).
9. Tidak memiliki bagian yang bergerak sehingga memudahkan perawatan dan pemeliharannya.
10. Biaya perawatan yang rendah jika dibandingkan dengan unit operasi lain.

2.8. Membran PVC

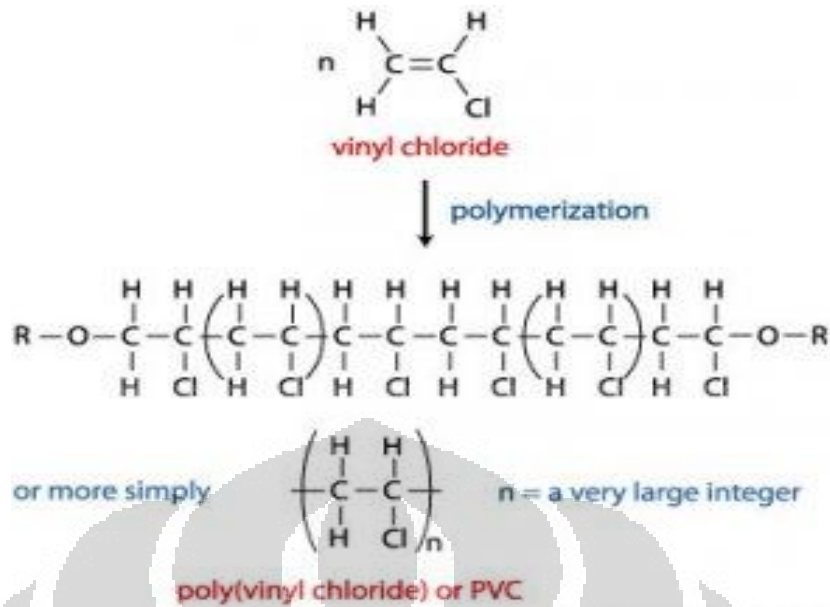
Pada penelitian kali ini, membran yang digunakan adalah membran berpori (*porous membrane*). Penggunaan membran berpori bertujuan agar proses difusi gas ke dalam absorben dapat berlangsung dengan baik. Pada membran berpori, proses pemisahan didasarkan pada perbedaan ukuran partikel. Sedangkan, komponen penyusun membran hanya berpengaruh kecil pada proses separasi. Selain itu, pemilihan jenis membran juga mempengaruhi peristiwa yang terjadi dalam membran, seperti stabilitas kimia, adsorpsi, dan pembersihan membran. Permasalahan utama yang terjadi dalam penggunaan membran ini adalah karena adanya proses polarisasi konsentrasi dan *fouling*. Oleh karena itu, faktor penting

lainnya dalam pemilihan membran adalah kemudahan dalam mencegah *fouling*. Gambar 2.5 di bawah ini adalah hasil foto SEM (*Scanning Electron Microscope*) untuk membran berpori:



Gambar 2.5 Hasil foto SEM untuk membran berpori (Wang et.al, 2003)

Polivinil klorida (PVC) merupakan salah satu polimer adisi sintetik yang banyak dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari. PVC adalah bahan yang cukup kuat untuk digunakan sebagai membran dengan kondisi laju alir yang tinggi. PVC bersifat inert terhadap bahan kimia sehingga tidak mengganggu reaksi antara CO_2 dengan absorben senyawa amina pada proses absorpsi. Gambar 2.6 pada halaman berikutnya menggambarkan struktur dari monomer dan polimer PVC.



Gambar 2.6 Monomer dan polimer PVC (Fessenden, 1986)

PVC dapat dihasilkan dari minyak bumi dan garam dapur (NaCl). Dalam pembentukan monomer PVC, minyak bumi harus diolah terlebih dahulu melalui proses *cracking* (pemecahan molekul) sehingga menghasilkan etilena (C_2H_4). Sedangkan, garam dapur diolah melalui proses elektrolisa menjadi natrium hidroksida (NaOH) dan gas klor (Cl_2). Hasil pengolahan kedua bahan baku tersebut selanjutnya akan digunakan dalam pembuatan monomer PVC.

Sifat PVC yang menarik membuatnya cocok untuk berbagai macam penggunaan. PVC tahan secara biologi dan kimia, membuatnya menjadi plastik yang dipilih sebagai bahan pembuat pipa pembuangan dalam rumah tangga dan pipa lainnya di mana korosi menjadi pembatas pipa logam. Dengan tambahan berbagai bahan anti tekanan dan *stabilizer*, PVC menjadi bahan yang populer sebagai bingkai jendela dan pintu. Dengan penambahan *plasticizer*, PVC menjadi cukup elastis untuk digunakan sebagai insulator kabel. Rangkuman sifat-sifat PVC disajikan dalam Tabel 2.5:

Tabel 2.5 Sifat-sifat PVC

Sifat	Keterangan
Specific gravity	1.16 – 1.35
Tensile strength (MPa)	10.3 – 24.1
Elongation at break (%)	200 – 450

2.9. Penelitian-penelitian Mengenai Absorpsi Gas CO₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga

Pengembangan kontaktor membran serat berongga sebagai modul yang efektif dalam operasi perpindahan massa antara gas-liquid dan liquid-liquid secara intensif dilakukan oleh Alan Gabelman dan Sun-Tak Hwang. Kontaktor membran tidak hanya digunakan pada proses absorpsi CO₂ pada industri pengolahan gas, tetapi juga digunakan pada proses fermentasi, farmasi, pengolahan air limbah, dan industri semikonduktor (Gabelman dan Hwang, 1999). Kontaktor membran hadir sebagai teknologi baru yang menggantikan kolom konvensional (*packed column*). Modul ini dapat mengatasi berbagai permasalahan pada kolom konvensional, seperti *flooding*, *loading*, dan *entraining* (Gabelman dan Hwang, 1999).

Proses absorpsi CO₂ dengan menggunakan campuran senyawa amina pada kontaktor membran juga diteliti oleh Lu dkk. Lu menggunakan campuran *glycine salt* (GLY) dan MEA. Hasilnya menunjukkan bahwa larutan campuran senyawa amina adalah absorben yang efisien dalam mengabsorpsi gas CO₂ (Jian-gang et.al, 2009). Analisis pada penelitian tersebut menggunakan studi perpindahan massa dan hidrodinamika untuk menganalisis secara kuantitatif perpindahan massa yang terjadi antara gas-liquid.

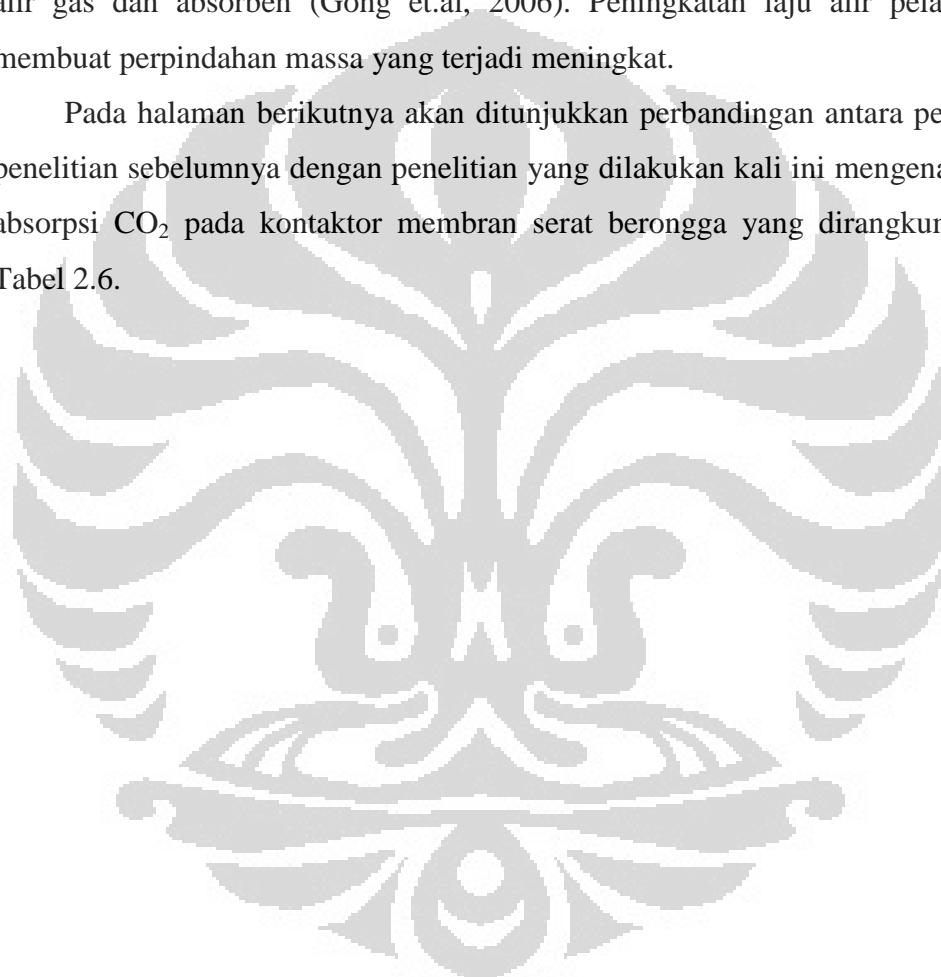
Lu menggunakan variasi laju alir pelarut (liquid). Variasi pelarut yang digunakan oleh Lu adalah GLY dan campuran GLY + MEA, dengan laju alir gas CO₂ yang berbeda. Peningkatan laju alir pelarut mengakibatkan koefisien perpindahan massa juga semakin naik. Hasil penelitian Lu menunjukkan bahwa pelarut campuran senyawa amina lebih efektif dalam menyerap gas CO₂ daripada pelarut tunggal. Jadi, laju alir pelarut berbanding lurus dengan koefisien perpindahan massa.

Su-Hsia Lin dkk. melakukan penelitian absorpsi CO₂ pada kontaktor membran dengan variasi laju alir gas, laju alir pelarut (liquid), dan konsentrasi absorben. Fluks absorpsi CO₂ meningkat seiring dengan peningkatan laju alir gas dan konsentrasi absorben (Lin et.al, 2009). Variasi laju alir gas yang digunakan oleh Su-Hsia Lin berada pada rentang 300 – 500 cm³/min. Pelarut yang digunakan pada penelitian Su adalah pelarut campuran (piperazine-alkanolamine). Laju alir

gas umpan (gas CO₂) berbanding lurus dengan fluks perpindahan massa yang terjadi.

Yanwen Gong dkk. melakukan penelitian proses absorpsi CO₂ pada kontaktor membran dengan pelarut campuran MDEA/MEA. Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Yanwen menunjukkan bahwa MDEA/MEA adalah absorben yang efektif dan efisien dalam menyerap gas CO₂. Fluks absorpsi CO₂ naik seiring dengan peningkatan komposisi MEA dalam campurannya dengan MDEA dan laju alir gas dan absorben (Gong et.al, 2006). Peningkatan laju alir pelarut juga membuat perpindahan massa yang terjadi meningkat.

Pada halaman berikutnya akan ditunjukkan perbandingan antara penelitian-penelitian sebelumnya dengan penelitian yang dilakukan kali ini mengenai proses absorpsi CO₂ pada kontaktor membran serat berongga yang dirangkum dalam Tabel 2.6.



Tabel 2.6 Perbandingan antara penelitian sebelumnya dengan penelitian kali ini

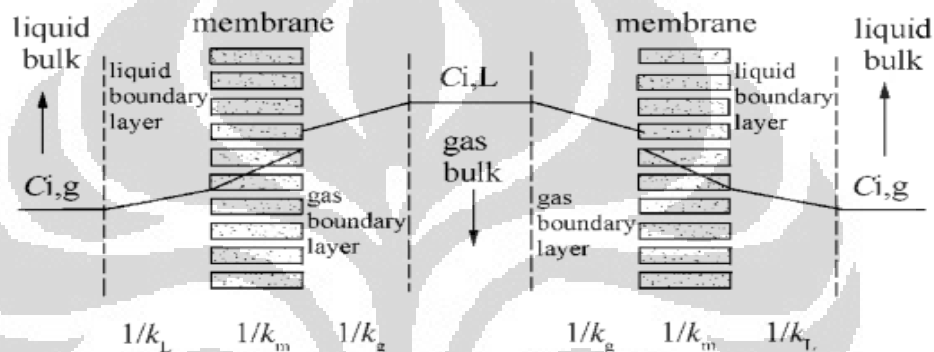
Peneliti	Judul Penelitian	Penelitian
Alan Gabelman dan Sun-Tak Hwang	Hollow Fiber Membrane Contactors	Pengembangan kontaktor membran serat berongga sebagai modul yang efektif dalam operasi perpindahan massa antara gas-liquid dan liquid-liquid secara intensif
Lu Jian-gang dkk.	Membrane Based CO ₂ Absorption Into Blended Amine Solutions	Proses absorpsi CO ₂ dengan menggunakan campuran senyawa amina (GLY dan MEA) pada kontaktor membran
Su-Hsia Lin dkk.	Absorption Of Carbon dioxide By Mixed Piperazine-Alkanolamine Absorbent In A Plasma-Modified Polypropylene Hollow Fiber Contactor	Penelitian absorpsi CO ₂ pada kontaktor membran dengan variasi laju alir gas, laju alir pelarut (liquid), dan konsentrasi absorben.
Yanwen Gong dkk.	Experiments And Simulation Of CO ₂ Removal By Mixed Amines In A Hollow Fiber Membrane Module	Penelitian proses absorpsi CO ₂ pada kontaktor membran dengan pelarut campuran MDEA/MEA.
Servatius B. A. (Penelitian yang akan dilakukan)	Absorpsi Gas CO ₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Larutan Penyerap Tunggal Dan Campuran Senyawa Amina : Pengaruh Laju Alir CO ₂	Penelitian proses absorpsi CO ₂ pada kontaktor membran serat berongga dengan pelarut tunggal (DEA) dan campuran senyawa amina (MEA/DEA) dengan variasi laju alir gas CO ₂ (<i>feed gas</i>)

2.10. Studi Perpindahan Massa Pada Kontaktor Membran Serat Berongga

Mekanisme perpindahan massa yang terjadi pada modul kontaktor membran serat berongga adalah:

- Difusi CO₂ dari fasa gas ke permukaan membran
- Difusi CO₂ melewati pori membran ke permukaan cairan / pelarut
- Pelarutan CO₂ ke dalam larutan absorben diikuti dengan difusi dari larutan ataupun reaksi kimia.

Mekanisme perpindahan massa pada proses absorpsi CO₂ dengan tiga tahanan seri digambarkan dalam Gambar 2.7 di bawah ini:



Gambar 2.7 Mekanisme perpindahan massa pada proses absorpsi CO₂ dengan tiga tahanan seri (Jian-gang et.al, 2009)

Gas yang digunakan pada penelitian ini adalah gas CO₂ murni sehingga lapisan batas pada fasa gas dapat diabaikan. Selain itu, membran dalam penelitian ini yang bersifat hidrofobik membuat tahanan utama pada perpindahan massa yang terjadi pada modul hanya berada pada fasa cair. Pada penelitian ini, prinsip metode yang digunakan untuk mengetahui perpindahan massa yang terjadi pada proses absorpsi adalah dengan mengamati perbedaan konsentrasi absorben (sampel) sebelum dan sesudah dilewati gas CO₂.

Neraca massa pada absorpsi gas-cair di dalam modul secara differensial adalah:

$$-Q_G dC_G = Q_L dC_L = k_L (C^* - C) dA \quad (2.8)$$

Q_G = laju alir volumetrik fasa gas

C_G = konsentrasi fasa gas

Q_L = laju alir volumetrik fasa liquid

- C_L = konsentrasi liquid
 k_L = koefisien perpindahan massa
 C^* = konsentrasi gas dalam keadaan setimbang
 C = konsentrasi sampel (absorben)

Menurut hukum Henry :

$$C_G = HC^* \quad (2.9)$$

- C^* = konsentrasi CO₂ dalam kesetimbangan dalam modul
 H = konstanta Yang-Cussler

Gaya penggerak *overall* yang melewati membran untuk proses perpindahan massa CO₂ secara diferensial adalah:

$$d(C^* - C) = -\left(1 - \frac{Q_L}{Q_G H}\right) dC = -H' dC \quad (2.10)$$

Konstanta Yang-Cussler dirumuskan sebagai berikut:

$$H' = 1 - \frac{Q_L}{Q_G H} \quad (2.11)$$

Dengan mensubstitusikan dC dari persamaan (2.10) ke persamaan (2.8) dan mengintegrasikan dengan kondisi batas:

$$A = 0; C^* - C = C_0^* - C_0;$$

$$A = A; C^* = C_1^*$$

sehingga,

$$\ln \frac{(C_1^* - C_1)}{C_0^* - C_0} = -\frac{k_L H' A}{Q_L} \quad (2.12)$$

Tanda subskrip 0 dan 1 pada persamaan di atas mengacu pada konsentrasi CO₂ yang terlarut pada masukan dan keluaran modul.

Jumlah tahanan keseluruhan untuk perpindahan gas di dalam sistem kontaktor membran yang berhubungan dengan koefisien perpindahan massa:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{Hk_G} + \frac{1}{Hk_m} + \frac{1}{k_L} \quad (2.13)$$

- K = jumlah tahanan

- k_G = tahanan gas
 k_M = tahanan membran
 k_L = tahanan liquid

Koefisien perpindahan massa overall dapat diperoleh dari persamaan (2.8) yang diubah bentuknya menjadi:

$$k_L = \frac{Q_L}{A} \ln \frac{(C^* - C_0)}{(C^* - C_1)} \quad (2.14)$$

- A = luas permukaan perpindahan massa
 C^* = konsentrasi CO_2 yang berada pada kondisi kesetimbangan. Nilai C^* diperoleh dari hukum Henry.

Untuk menghitung fluks karbondioksida yang mengalir digunakan persamaan

$$J = k_L \Delta C \quad (2.15)$$

ΔC = perbedaan konsentrasi absorben sebelum dan sesudah meng-absorb CO_2 .

Pada aliran gas dalam kontaktor membran, bentuk korelasi perpindahan massa ditunjukkan dengan bilangan tak berdimensi Sherwood (Sh) dan Reynold (Re):

$$Sh = a Re^b Sc^c \quad (2.16)$$

Dimana,

$$Sh = k_l \frac{d_e}{D} \quad (2.17)$$

$$Re = \frac{\rho v d_e}{\mu} \quad (2.18)$$

- k_l = koefisien perpindahan massa fasa cair
 d_e = diameter ekuivalen
 D = difusivitas CO_2 pada fasa cair
 ρ = massa jenis gas CO_2
 v = kecepatan gas CO_2 yang melewati *shell*
 μ = viskositas CO_2

Untuk aliran fluida di dalam dan di luar membran, faktor yang perlu diperhatikan adalah faktor kekosongan, yang dituliskan dalam sebuah persamaan:

$$\varepsilon = 1 - n_{\text{fiber}} \left(\frac{d_{\text{o,fiber}}}{D_{\text{i,module}}} \right)^2 \quad (2.19)$$

ε = faktor kekosongan

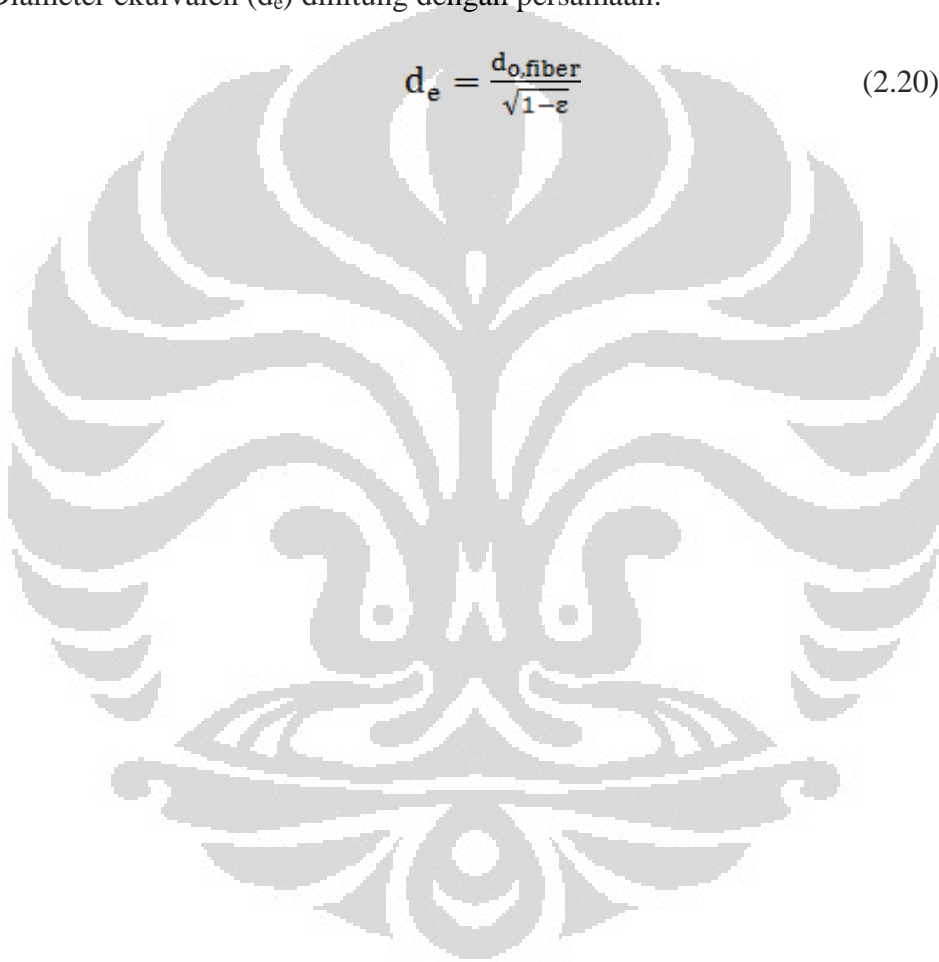
$d_{\text{o,fiber}}$ = diameter luar serat

$D_{\text{i,module}}$ = diameter dalam selongsong modul

n_{fiber} = jumlah serat dalam modul

Diameter ekuivalen (d_e) dihitung dengan persamaan:

$$d_e = \frac{d_{\text{o,fiber}}}{\sqrt{1-\varepsilon}} \quad (2.20)$$



BAB 3

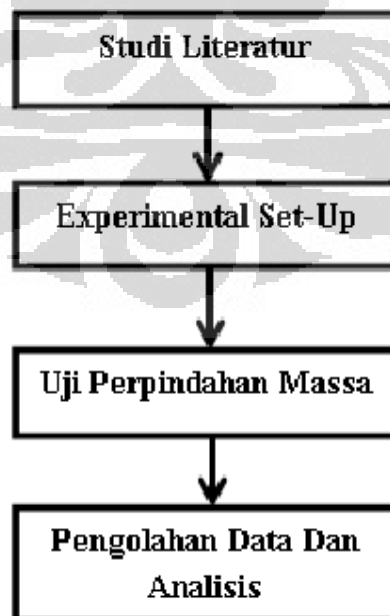
METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Pendahuluan

Penelitian absorpsi CO₂ dengan menggunakan pelarut tunggal DEA dan campuran MEA-DEA bertujuan untuk menentukan apakah proses absorpsi gas CO₂ ke dalam absorben tunggal (DEA) dan campuran (MEA dan DEA) senyawa amina yang terjadi pada kontaktor membran serat berongga efektif atau tidak. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis efek variasi laju alir gas umpan dan jumlah serat dalam modul terhadap perpindahan massa yang terjadi. Evaluasi efektifitas kontaktor membran serat berongga dilakukan dengan analisis studi perpindahan massa. Variabel yang menjadi perhatian adalah laju alir gas CO₂ sebagai gas umpan dan jumlah serat dalam modul.

3.2. Rancangan Penelitian

Secara garis besar, penelitian dilakukan dalam empat tahap utama, yaitu studi literatur, *experimental set-up*, uji perpindahan massa, serta pengolahan data dan analisis hasil. Diagram alir penelitian yang akan dilakukan diperlihatkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2.1. Studi Literatur

Sebelum melakukan penelitian di laboratorium, langkah pertama yang harus dilakukan adalah mempelajari literatur-literatur yang berhubungan dengan penelitian ini. Teori yang digunakan adalah teori yang berhubungan dengan fenomena absorpsi dan studi perpindahan massa. Absorpsi dan difusi adalah subbab pada studi perpindahan massa yang digunakan untuk menjelaskan fenomena absorpsi CO₂ pada kontaktor membran. Studi perpindahan massa juga digunakan untuk menganalisis jumlah CO₂ yang diserap oleh absorben. Literatur lain yang digunakan dalam penelitian ini adalah MSDS (*material safety data sheet*) mengenai MEA dan DEA. MSDS penting untuk diketahui dalam melakukan *risk assessment*.

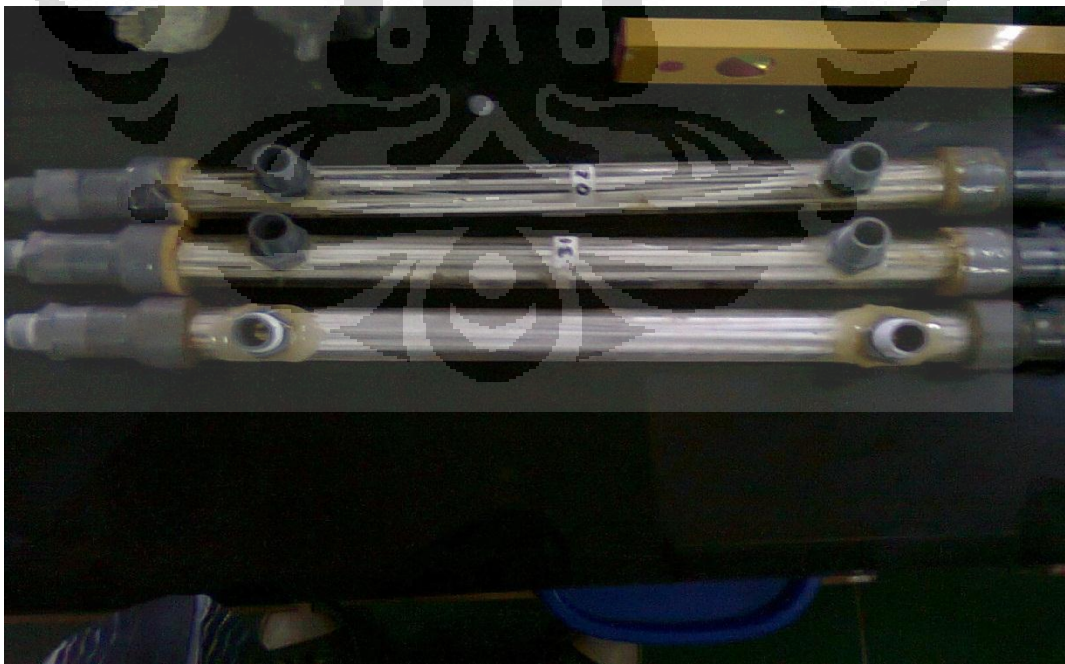
3.2.2. Experimental Set-Up

a. Alat:

1. Kontaktor membran serat berongga sebagai modul
2. Ember sebagai wadah bagi pelarut
3. Drum penampung limbah
4. Pompa aquarium untuk memompa pelarut
5. Tabung gas yang berisi gas CO₂ murni
6. Papan kayu
7. Needle valve untuk membuka dan menutup tabung gas
8. Valve untuk mengatur laju alir pelarut
9. Regulator gas untuk mengatur laju alir gas CO₂ dan mengetahui tekanan gas saat keluar dari tabung
10. Gas flow meter untuk mengatur dan mengetahui besarnya laju alir gas
11. Liquid flow meter untuk mengetahui besarnya laju alir pelarut (absorben)
12. pH meter untuk mengukur pH absorben (sampel)
13. Selang silicon
14. Kawat pengait untuk mengaitkan modul kontaktor membran serat berongga pada papan kayu
15. Termometer untuk mengukur suhu sampel
16. Beaker glass untuk menampung sampel yang akan diukur pH dan suhu nya



Gambar 3.2 Papan kayu sebagai tempat unit operasi



Gambar 3.3 Kontaktor membran serat berongga dengan jumlah serat 20, 30, dan 40



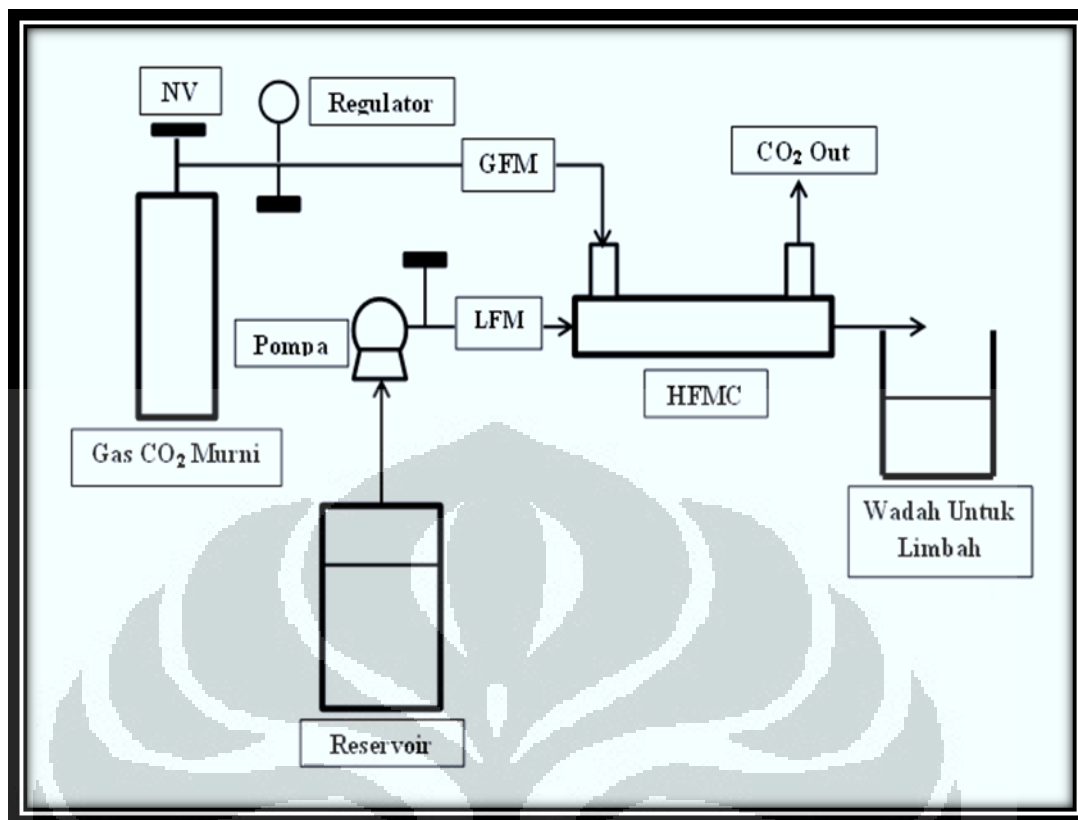
Gambar 3.4 Tabung gas CO₂

b. Bahan:

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

c. Skema Alat

Skema rangkaian kontaktor membran serat berongga dengan peralatan lain:



Gambar 3.5 Skema alat penelitian

Keterangan :

NV : Needle Valve HFMC : Hollow Fiber Membrane Contactor
 GFM : Gas Flow Meter LFM : Liquid Flow Meter

3.2.3. Uji Perpindahan Massa

Prosedur Penelitian:

1. Membuat modul dan *experimental set-up* seperti pada gambar 3.5 di atas. Menghubungkan modul dengan peralatan lain, seperti reservoir, pompa, tabung gas CO₂, gas flow meter, dan liquid flow meter.
2. Menyiapkan aquades, larutan DEA, dan larutan campuran MEA dan DEA sebagai pelarut / absorben.
3. Mengalirkan gas CO₂ dengan variasi laju alir dan jumlah serat. Kemudian, menunggu hingga keadaan stabil. Variasi laju alir gas CO₂ : 300, 350, 400, 450, dan 500 cm³ / menit. Jumlah serat yang digunakan adalah 20, 30, dan 40 serat. Gas CO₂ dialirkan dengan tekanan tetap yang ditentukan dengan regulator gas. Laju alir CO₂ dan jumlah serat adalah variabel bebas.

4. Mengalirkan pelarut tanpa variasi laju alir dan menunggu hingga keadaan stabil. Laju alir pelarut = 0.17 liter / menit. Laju alir pelarut adalah variabel tetap. Komposisi pelarut juga adalah variabel tetap. Komposisi pelarut yang digunakan (dalam persen volume):
 - DEA : Aquades = 17% : 83% = 2 L + 10 L = 12 L
 - MEA : DEA : Aquades = 8% : 17% : 75% = 1 L + 2 L + 9 L = 12 L
 5. Kondisi operasi yang digunakan (variabel tetap) adalah tekanan 1 atm dan suhu ruang (25°C).
 6. Mengambil data sampel berupa suhu, pH awal, dan pH akhir untuk setiap sampel (setiap variasi laju alir gas CO₂ dan jumlah serat).
 7. Mengulangi prosedur 3 hingga 6 untuk setiap variasi laju alir *feed gas* dan jumlah serat.
- *NB: Pengambilan data sampel dilakukan setelah sistem berada pada kondisi tunak (sekitar 5 hingga 10 menit).

3.2.4. Pengolahan Data

3.2.4.1. Koefisien Dan Fluks Perpindahan Massa

Data yang didapatkan pada uji perpindahan massa absorpsi gas CO₂ ke dalam pelarut campuran senyawa amina adalah suhu (T), pH awal, dan pH akhir absorben. Dari data-data tersebut, maka didapatkan koefisien dan fluks perpindahan massa gas CO₂ ke dalam pelarut tunggal DEA dan campuran MEA-DEA dengan 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 (m³ / s)
- A = luas kontak perpindahan massa (m²)
- C^* = kelarutan CO₂ murni di dalam pelarut (mol / L)
- C_0 = konsentrasi gas CO₂ awal dalam absorben
- C_1 = konsentrasi gas CO₂ akhir dalam absorben

C^* dapat dihitung dengan mendapatkan konstanta Henry (k_H) terlebih dahulu:

$$k_H = 0.036 \exp\left(-2200\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^0}\right)\right) \quad (3.2)$$

Kemudian,

$$C^* = \frac{k_H}{P} \quad (3.3)$$

Dimana:

k_H = konstanta Henry

T = temperature (K)

P = tekanan (atm)

Persamaan (3.3) merupakan persamaan untuk mendapatkan kelarutan gas CO_2 dalam pelarut.

Kelarutan CO_2 pada senyawa amina dituliskan dengan persamaan:

$$C^* = \frac{1}{2} [M_{DEA}]_{awal} \quad (3.4)$$

$$C^* = \frac{1}{2} [M_{MEA/DEA}]_{awal} \quad (3.5)$$

Luas kontak perpindahan massa pada modul membran dihitung dengan persamaan:

$$A_m = n_f \cdot \pi \cdot d_f \cdot L \quad (3.6)$$

Dimana:

A_m = luas kontak perpindahan massa (m^2)

n_f = jumlah serat dalam modul

d_f = diameter serat (m)

L = panjang modul (m)

Fluks perpindahan massa dapat dihitung dengan:

$$J = k_L \Delta C \quad (3.7)$$

k_L = koefisien perpindahan massa (m / s)

ΔC = perbedaan konsentrasi awal dan akhir (mol / L)

3.2.4.2. Korelasi Perpindahan Massa

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

Kedua bilangan tersebut dirumuskan sebagai berikut:

$$Sh = k \frac{d_e}{D} \quad (3.8)$$

$$Re = \frac{\rho v d_e}{\mu} \quad (3.9)$$

Dimana:

k = koefisien perpindahan massa (m / s)

d_e = diameter ekivalen modul (m)

D = difusivitas CO₂ (m² / s)

ρ = massa jenis CO₂ (kg / m³)

v = kecepatan aliran (m / s)

μ = viskositas gas CO₂ (kg / (m.s))

Persamaan (3.8) dan (3.9) adalah persamaan-persamaan untuk menunjukkan hubungan koefisien perpindahan massa terhadap jenis aliran pada modul, baik aliran laminar maupun turbulen.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efek variasi laju alir gas CO₂ dan jumlah serat terhadap koefisien dan fluks perpindahan massa pada modul kontaktor membran serat berongga. Tujuan lain dari penelitian ini adalah menentukan apakah proses absorpsi gas CO₂ ke dalam absorben tunggal (DEA) dan campuran (MEA dan DEA) senyawa amina yang terjadi pada modul efektif atau tidak. Evaluasi terhadap efektifitas proses absorpsi yang terjadi dalam modul ditinjau dari studi perpindahan massa. Analisis mengenai studi hidrodinamika tidak digunakan pada penelitian ini. Studi hidrodinamika digunakan untuk mengetahui pengaruh jenis aliran dalam membran (*tube*) terhadap efektifitas perpindahan massa yang terjadi. Namun, karena penelitian ini tidak terfokus pada pengaruh jenis aliran pelarut dalam membran, maka analisis terhadap studi hidrodinamika tidak dipaparkan.

Perpindahan massa yang terjadi pada modul ditinjau dari profil koefisien dan fluks perpindahan massa terhadap variasi laju alir gas CO₂, jumlah serat, dan jenis pelarut. Selain itu, variasi kecepatan gas CO₂ dan perpindahan massa yang terjadi dapat dihubungkan dengan suatu korelasi perpindahan massa. Korelasi perpindahan massa dijelaskan dengan hubungan antara bilangan Reynold (Re) dan Sherwood (Sh), dimana kedua bilangan tersebut juga berhubungan dengan sistem perpindahan massa. Selain itu, pada bab ini akan ditampilkan pula persentase (%) konsentrasi gas CO₂ yang diserap oleh setiap pelarut.

4.1. Studi Perpindahan Massa

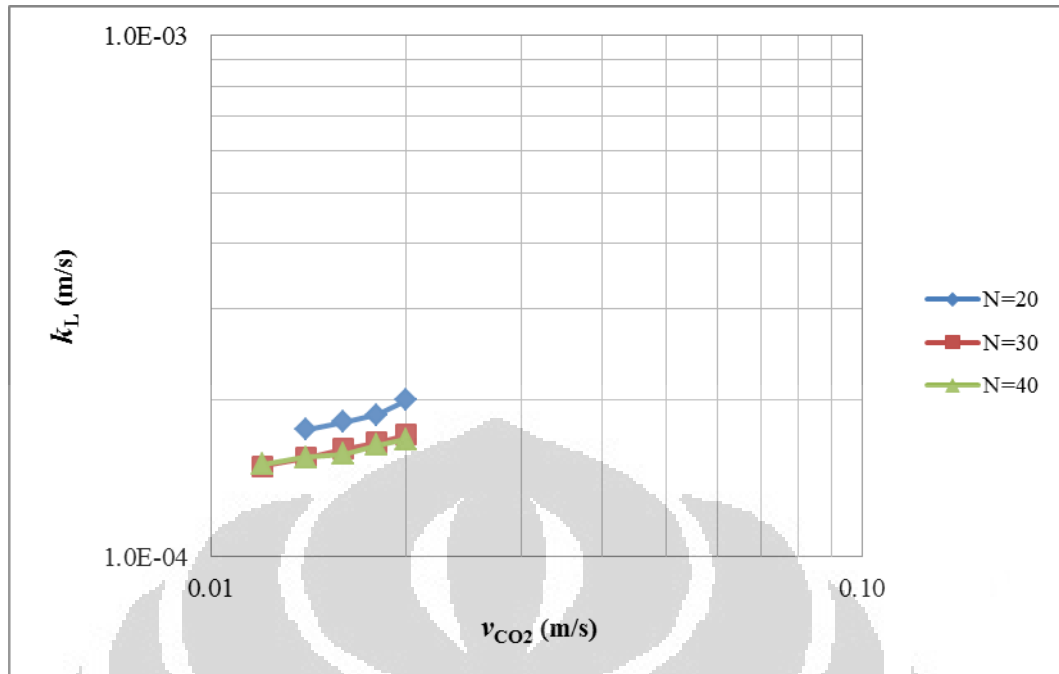
Studi perpindahan massa pada penelitian absorpsi gas CO₂ ke dalam pelarut senyawa amina dalam kontaktor membran serat berongga ini menggunakan parameter koefisien dan fluks perpindahan massa. Kedua besaran ini menunjukkan seberapa besar perpindahan massa yang terjadi melalui perubahan konsentrasi pelarut (absorben) sebelum dan setelah melewati modul yang telah dialiri gas CO₂. Perpindahan massa terjadi dari gas CO₂ yang mengalir melalui *shell* (selongsong) ke absorben yang mengalir melalui serat (*tube*). Untuk setiap

variasi laju alir gas CO₂, jumlah serat, dan jenis pelarut pada percobaan studi perpindahan massa dilakukan pengambilan data berupa pH dan suhu sampel. Pengambilan data sampel dilakukan sebanyak tiga kali untuk tujuan keakuratan.

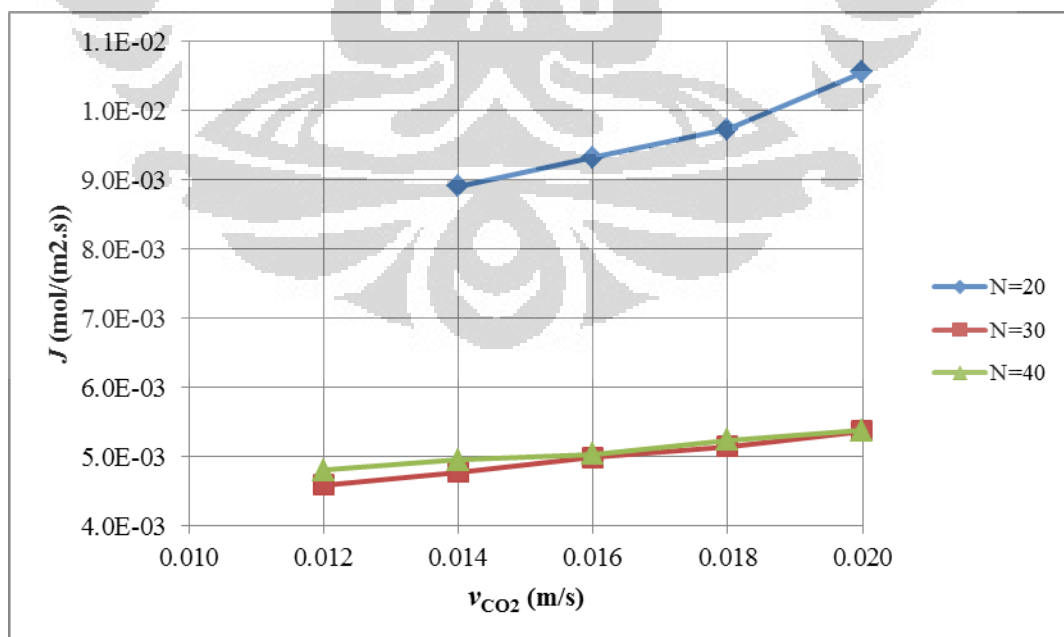
4.1.1. Pengaruh Laju Alir Gas CO₂ Terhadap Koefisien Perpindahan Massa (k_L) dan Fluks Perpindahan Massa (J)

Absorpsi gas CO₂ ke dalam absorben melalui membran dipengaruhi oleh laju alir gas CO₂. Laju alir gas CO₂ yang semakin tinggi membuat jumlah gas CO₂ yang terdistribusi dalam *shell* semakin banyak. Hal ini membuat jumlah gas CO₂ yang berdifusi ke dalam membran semakin banyak pula. Peningkatan jumlah CO₂ yang berdifusi ke dalam pelarut menyebabkan laju perpindahan massa yang dihasilkan menjadi semakin naik, sehingga fluks perpindahan massa yang berbanding lurus dengan koefisien perpindahan massa juga semakin naik. Jadi, dapat disimpulkan bahwa koefisien dan fluks perpindahan massa berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan linear gas CO₂ sebagai *feed gas* yang mengalir dalam *shell*. Hal ini berarti bahwa semakin tinggi laju alir gas CO₂, efektifitas perpindahan massa semakin baik.

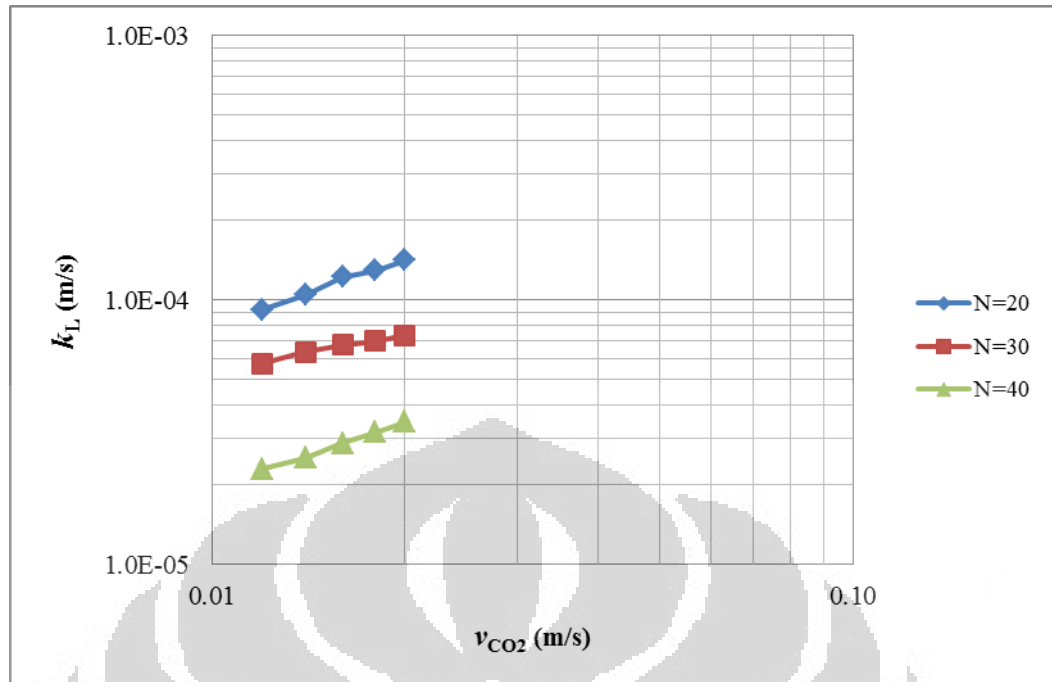
Pengaruh laju alir CO₂ terhadap koefisien dan fluks perpindahan massa juga dapat dilihat dari grafik hubungan antara laju alir CO₂ dengan k_L dan J . Hasil percobaan menunjukkan bahwa kenaikan linear laju alir gas CO₂ menyebabkan kenaikan kurva koefisien dan fluks perpindahan massa untuk setiap pelarut pada modul yang sama. Gambar 4.1 hingga 4.4 adalah hasil percobaan studi perpindahan massa untuk setiap variasi laju alir gas CO₂ pada setiap pelarut dan jumlah serat. Pada Gambar 4.1 hingga 4.4 terlihat hubungan antara laju alir gas CO₂ dengan koefisien (k_L) dan fluks (J) perpindahan massa dimana peningkatan kecepatan gas CO₂ menyebabkan kurva k_L dan J juga naik.



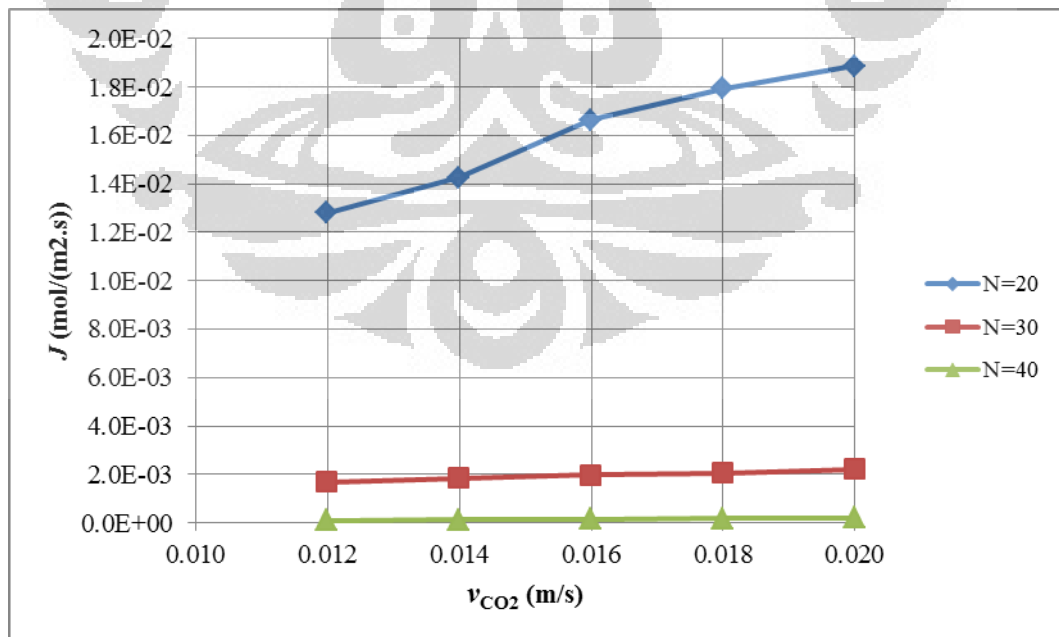
Gambar 4.1 Pengaruh variasi laju alir CO_2 , v_{CO_2} , terhadap koefisien perpindahan massa, k_L , untuk pelarut DEA



Gambar 4.2 Pengaruh variasi laju alir CO_2 , v_{CO_2} , terhadap fluks perpindahan massa, J , untuk pelarut DEA



Gambar 4.3 Pengaruh variasi laju alir CO₂, v_{CO_2} , terhadap koefisien perpindahan massa, k_L , untuk pelarut MEA + DEA



Gambar 4.4 Pengaruh variasi laju alir CO₂, v_{CO_2} , terhadap fluks perpindahan massa, J , untuk pelarut MEA + DEA

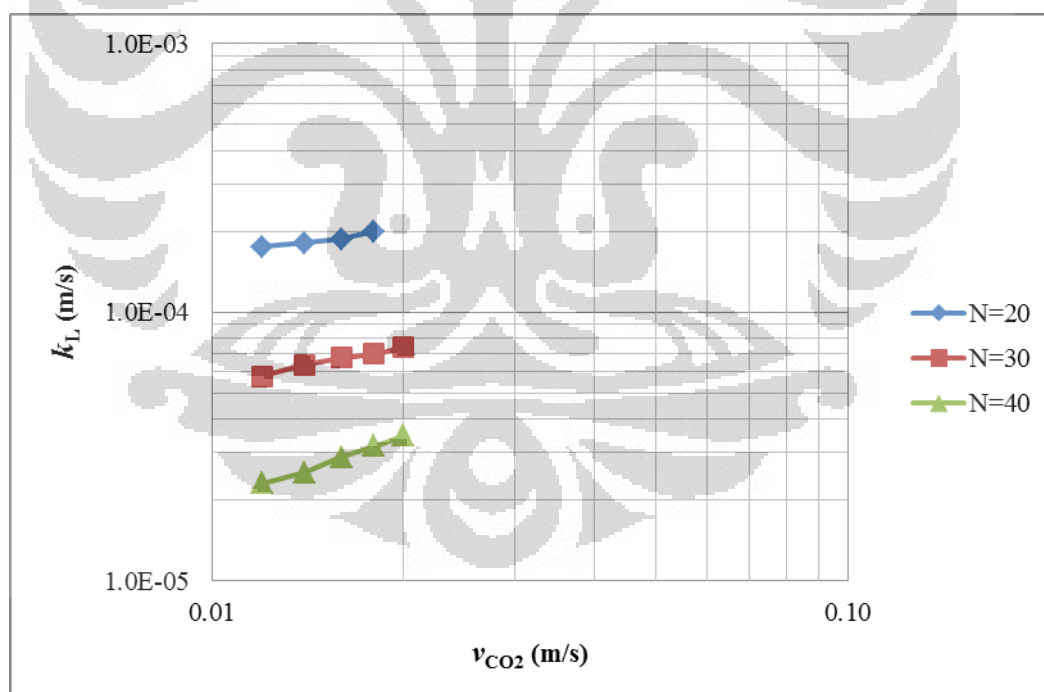
4.1.2. Pengaruh Jumlah Serat Dalam Modul Terhadap Koefisien Perpindahan Massa (k_L) dan Fluks Perpindahan Massa (J)

Penggunaan jumlah serat yang berbeda-beda pada modul bertujuan untuk mengetahui pengaruh jumlah serat terhadap efektifitas perpindahan massa pada proses absorpsi gas CO₂ ke dalam absorben melalui membran. Jumlah serat merupakan implementasi dari fraksi kepadatan membran. Koefisien perpindahan massa akan turun seiring dengan meningkatnya fraksi kepadatan membran. Semakin rendah fraksi kepadatan membran di dalam modul, maka kontak yang terjadi antara serat dengan pelarut semakin baik karena pergerakan serat di dalam modul juga semakin dinamis. Efek ini adalah efek permukaan baru (*surface renewal effect*) yang dapat menyebabkan terjadinya peningkatan koefisien perpindahan massa di dalam kontaktor membran serat berongga (Lipnizki dan Field, 2001). Pada kontaktor membran serat berongga dengan fraksi kepadatan rendah, aliran transversal dan *surface renewal effect* lebih berpengaruh terhadap kemampuan perpindahan massa. Sedangkan, pada fraksi kepadatan membran yang tinggi, efek *channeling* lebih berpengaruh karena adanya faktor pengotor yang cukup besar pada pori-pori membran.

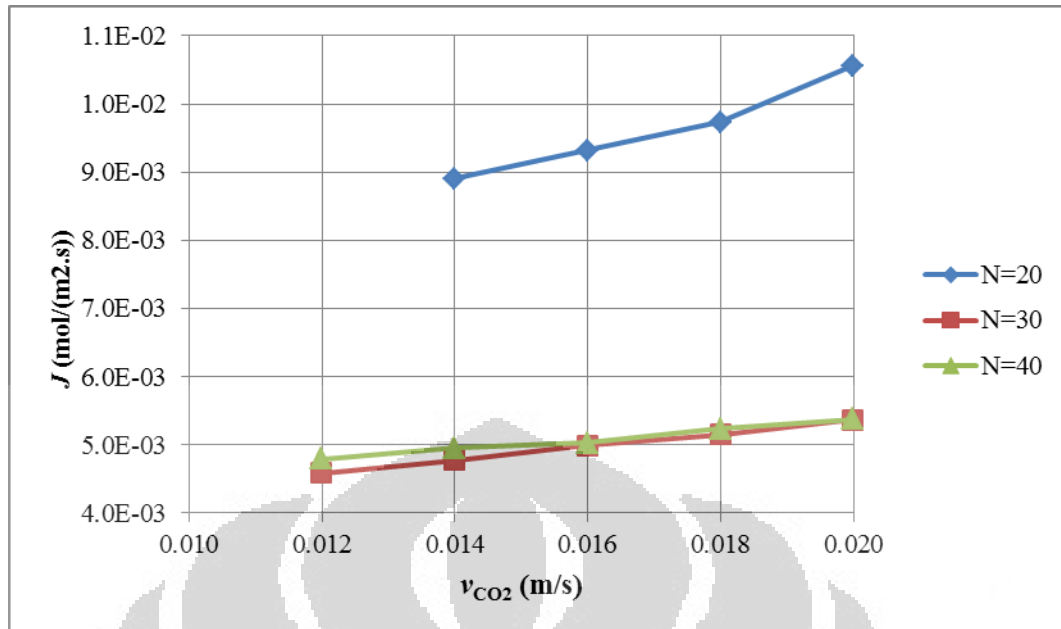
Pada sisi lain, peningkatan jumlah serat berarti peningkatan luas permukaan kontak antara gas CO₂ dengan absorben. Luas permukaan kontak yang besar seharusnya menyebabkan koefisien perpindahan massa juga menjadi besar. Namun, fakta menunjukkan bahwa peningkatan luas permukaan aliran dapat menurunkan koefisien perpindahan massa, sehingga nilai fluks perpindahan massa juga turun. Peningkatan jumlah serat berhubungan dengan tahanan yang ada pada fasa gas, membran, dan fasa cair. Gas CO₂ yang digunakan adalah gas CO₂ murni sehingga tidak terdapat tahanan gas. Absorpsi gas CO₂ ke dalam pelarut juga disertai dengan reaksi kimia antara CO₂ dengan DEA atau MEA-DEA sehingga fasa cair tidak memiliki tahanan. Tahanan yang ada hanyalah tahanan membran. Tahanan membran berupa pembentukan lapisan film pada membran. Semakin banyak jumlah serat akan meningkatkan pembentukan lapisan film pada membran. Lapisan film terbentuk pada lapisan *interfacial* gas-cair membran. Lapisan film ini dapat menghambat proses absorpsi gas CO₂ ke dalam pelarut dan mengakibatkan penurunan nilai koefisien dan fluks perpindahan massa. Jadi,

dapat dibuat suatu kesimpulan bahwa jumlah serat yang semakin banyak akan menurunkan efektifitas perpindahan massa pada modul karena turunnya nilai k_L dan J .

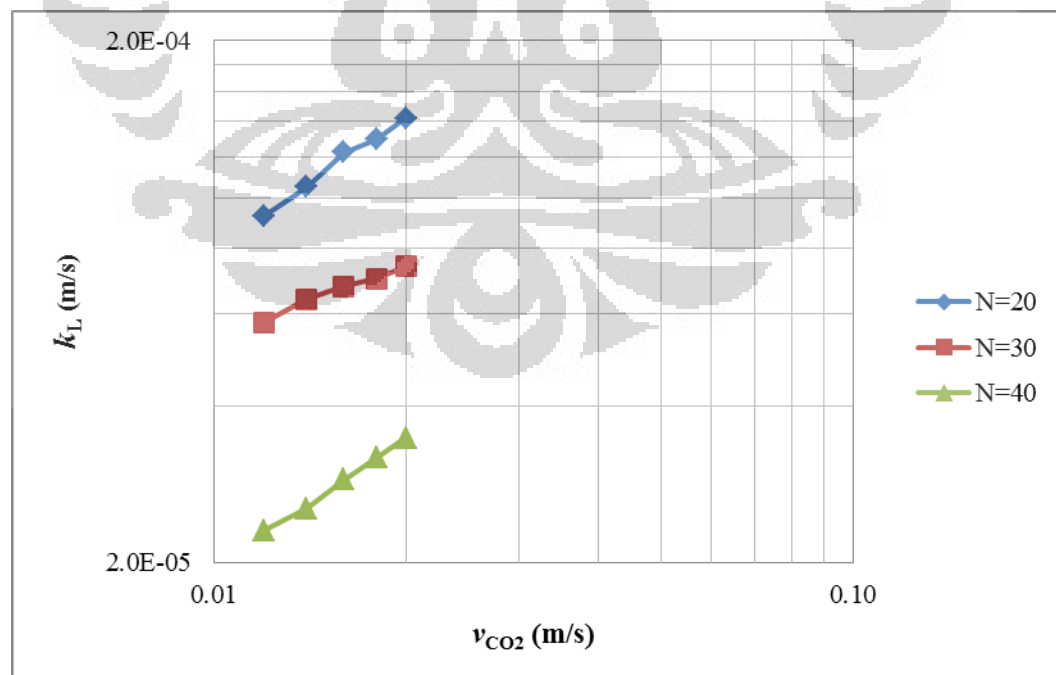
Berdasarkan grafik hasil percobaan yang dihasilkan, pada pelarut DEA, semakin banyak jumlah serat akan menyebabkan koefisien dan fluks perpindahan massa menjadi turun. Penurunan koefisien dan fluks perpindahan massa seiring dengan penambahan jumlah serat juga terjadi pada pelarut campuran MEA-DEA. Gambar 4.5 hingga 4.8 adalah grafik yang menunjukkan hasil penelitian pengaruh variasi jumlah serat untuk setiap pelarut dan laju alir gas CO_2 . Pada Gambar 4.5 hingga 4.8 terlihat bahwa semakin sedikit jumlah serat, nilai k_L dan J yang dihasilkan semakin tinggi. Gambar 4.5 hingga 4.8 juga sekaligus menunjukkan hubungan antara jumlah serat dalam modul dengan koefisien dan fluks perpindahan massa.



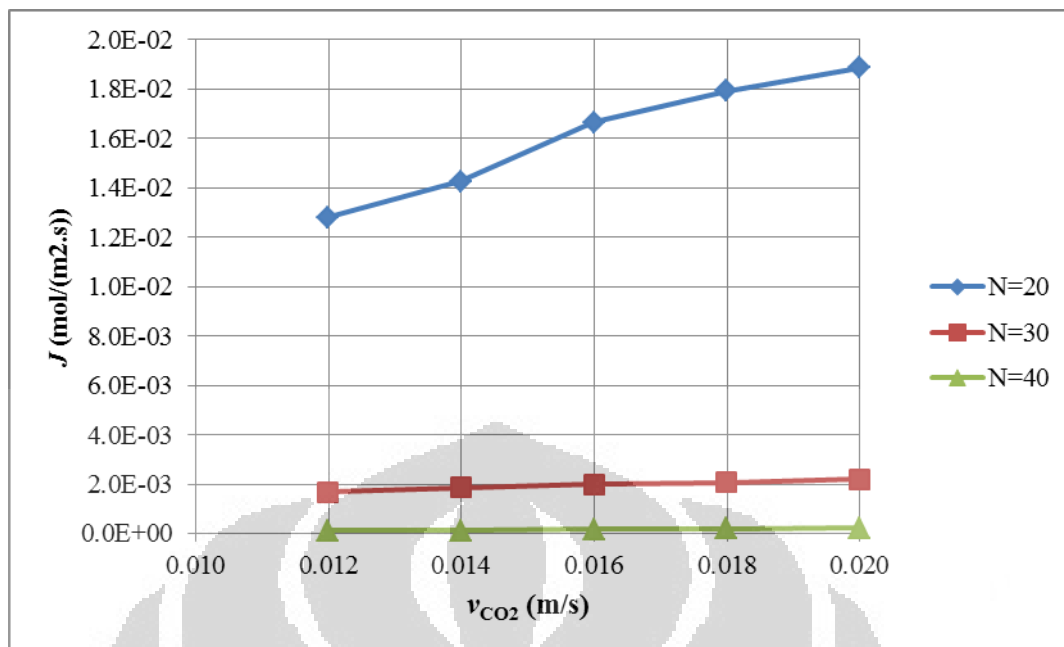
Gambar 4.5 Pengaruh variasi jumlah serat terhadap koefisien pindah massa, k_L , untuk pelarut DEA pada setiap laju alir CO_2 , v_{CO_2}



Gambar 4.6 Pengaruh variasi jumlah serat terhadap fluks perpindahan massa, J , untuk pelarut DEA pada setiap laju alir CO₂, v_{CO_2}



Gambar 4.7 Pengaruh variasi jumlah serat terhadap koefisien pindah massa, k_L , untuk pelarut MEA + DEA pada setiap laju alir CO₂, v_{CO_2}



Gambar 4.8 Pengaruh variasi jumlah serat terhadap fluks perpindahan massa, J , untuk pelarut MEA + DEA pada setiap laju alir CO_2 , v_{CO_2}

4.1.3. Pengaruh Jenis Pelarut Terhadap Koefisien Perpindahan Massa (k_L) dan Fluks Perpindahan Massa (J)

Seperti penjelasan pada bagian teori di bab 2, peristiwa absorpsi dapat terjadi secara fisika maupun kimia. Absorpsi fisika adalah perpindahan zat secara difusi ke zat lainnya karena adanya perbedaan konsentrasi. Sedangkan, absorpsi kimia adalah perpindahan zat ke zat lainnya secara difusi yang terjadi selain karena perbedaan konsentrasi juga terjadi karena adanya reaksi kimia antara kedua zat tersebut. Absorpsi kimia merupakan jenis absorpsi yang paling efektif daripada absorpsi fisika.

Untuk mengetahui proses absorpsi secara fisika, maka aquades digunakan sebagai salah satu pelarut pada penelitian ini. Pada dasarnya, proses absorpsi gas CO_2 ke dalam aquades juga terjadi secara kimia menurut reaksi kimia yang telah dijelaskan pada bagian teori di bab 2. Reaksi antara gas CO_2 dengan aquades akan menghasilkan H_2CO_3 (*aq*). Namun, reaksi antara CO_2 dengan air (H_2O) adalah reaksi kesetimbangan, dimana konstanta kesetimbangan reaksi bernilai sangat kecil. Hal ini berarti bahwa pembentukan ion H^+ dan ion HCO_3^- juga bernilai

sangat kecil. Oleh karena itu, absorpsi CO₂ ke dalam air lebih digolongkan sebagai absorpsi fisika dengan mengabaikan reaksi kimia yang ada.

Jenis pelarut (absorben) yang digunakan untuk meng-absorb gas CO₂ memiliki kemampuan masing-masing dalam menyerap gas CO₂ yang tergantung dari perbedaan konsentrasi dengan gas CO₂ dan kemampuan bereaksi dengan gas CO₂. Penggunaan pelarut DEA dan pelarut campuran MEA-DEA bertujuan untuk mengevaluasi perpindahan massa pada proses absorpsi kimia gas CO₂. CO₂ adalah senyawa yang bersifat asam lemah. Sedangkan, MEA dan DEA adalah senyawa amina yang bersifat basa lemah. Oleh karena itu, pemilihan senyawa amina sebagai absorben didasarkan pada reaksi yang terjadi antara asam lemah (CO₂) dan basa lemah (amina). Adanya reaksi tersebut membuat laju absorpsi menjadi semakin cepat yang diharapkan dapat meningkatkan efektifitas perpindahan massa. Banyaknya gas CO₂ yang terserap diasumsikan sebanding dengan berkurangnya konsentrasi larutan DEA maupun MEA-DEA yang diakibatkan oleh reaksi antara CO₂ dengan absorben. Terjadinya reaksi antara CO₂ dengan pelarut dapat dibuktikan dengan suatu persamaan yang dikembangkan oleh Qi dan Cusler (1985):

$$Faktor\ Reaksi = \frac{4.k_L L}{d_f.v_L} \quad (4.1)$$

Berdasarkan data perbandingan faktor reaksi antara air, NaOH, dan DEA yang ditampilkan pada Tabel 4.1, DEA adalah pelarut yang memiliki nilai faktor reaksi yang paling tinggi diantara air dan NaOH. Air memiliki nilai faktor reaksi terkecil diantara ketiga pelarut. Hal ini membuktikan bahwa pada absorpsi CO₂ ke dalam air tetap terjadi reaksi dengan nilai konstanta kesetimbangan reaksi yang sangat kecil. Selain itu, nilai faktor reaksi pelarut DEA yang paling tinggi menunjukkan bahwa DEA adalah pelarut yang efektif dalam meng-absorb gas CO₂.

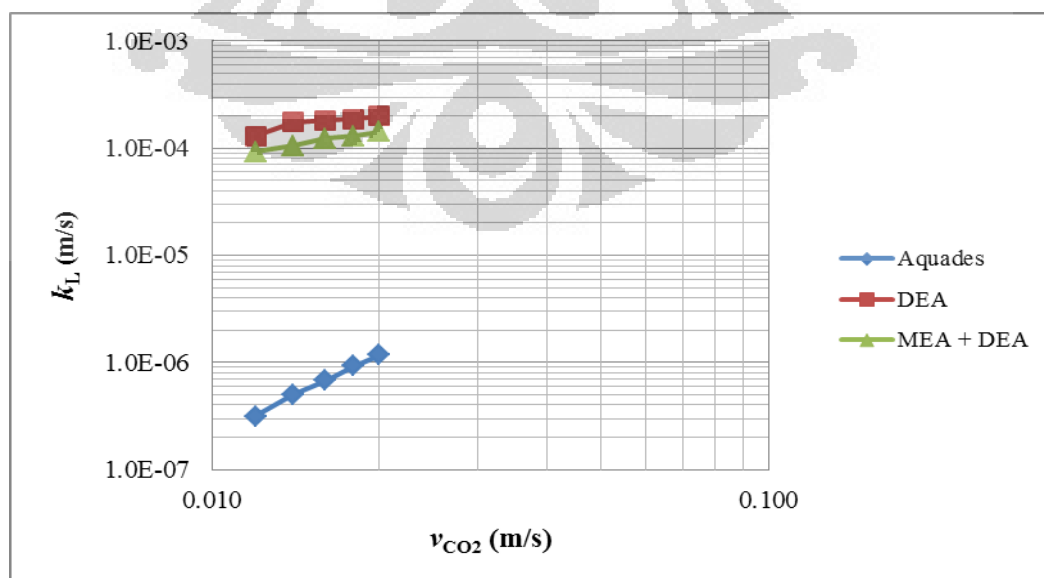
Pada penelitian ini, komposisi pelarut DEA yang digunakan sebagai pelarut tunggal adalah 17% volume dengan komposisi aquades 83% volume. Sedangkan, komposisi antara MEA, DEA, dan aquades sebagai pelarut campuran adalah 8%: 17%: 75% (dalam % volume). Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, komposisi MEA yang digunakan sebagai absorben pada proses absorpsi gas CO₂

adalah 15-20%, sedangkan untuk DEA, komposisi yang digunakan adalah 20-30% (Jian-gang et.al, 2009; Kartohardjono, 2007). Berdasarkan hasil penelitian, komposisi MEA yang terletak antara 15-20% volume dan DEA yang terletak antara 20-30% volume adalah kisaran komposisi dimana kedua absorben tersebut efektif dalam menyerap gas CO₂ (Jian-gang et.al, 2009; Kartohardjono, 2007).

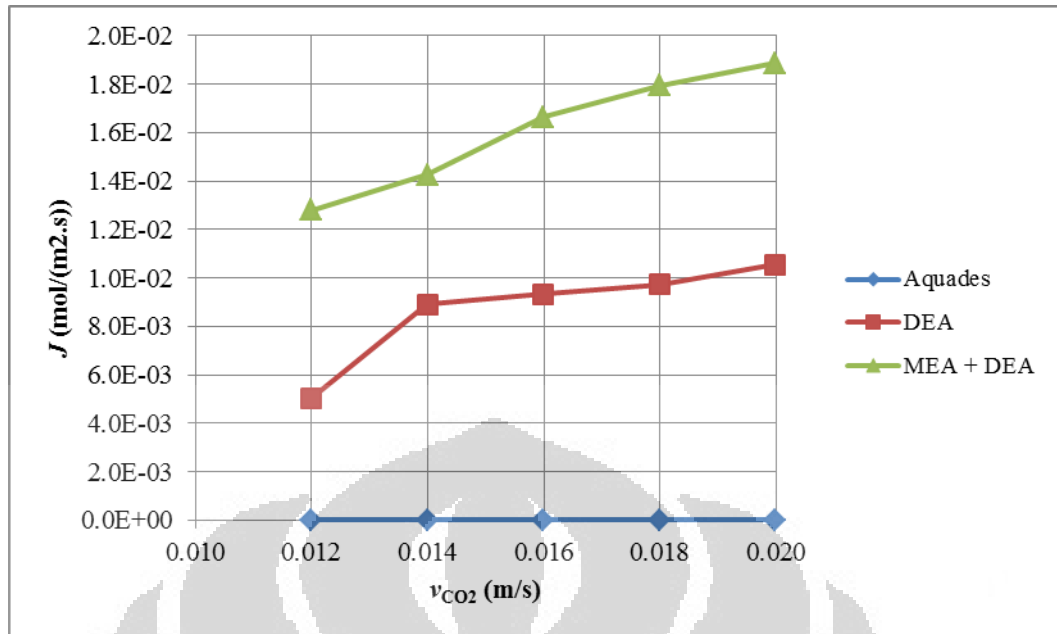
Perbandingan kemampuan pelarut dalam menyerap gas CO₂ juga ditunjukkan dengan hubungan antara koefisien perpindahan massa dan jenis pelarut. Berdasarkan grafik-grafik yang dihasilkan (Gambar 4.9 – Gambar 4.14), DEA menghasilkan nilai koefisien perpindahan massa yang paling baik daripada aquades dan campuran MEA-DEA. Hal ini menunjukkan bahwa DEA adalah pelarut yang paling efektif dalam menyerap gas CO₂ dibandingkan pelarut lain yang digunakan pada penelitian ini. Jadi, berdasarkan data perbandingan faktor reaksi pada Tabel 4.1 dan grafik yang dihasilkan (Gambar 4.9 – Gambar 4.14) dapat disimpulkan bahwa DEA adalah pelarut yang efektif dalam menyerap gas CO₂.

Tabel 4.1 Perbandingan faktor reaksi antara Air, NaOH, dan DEA (Subihi, 2007)

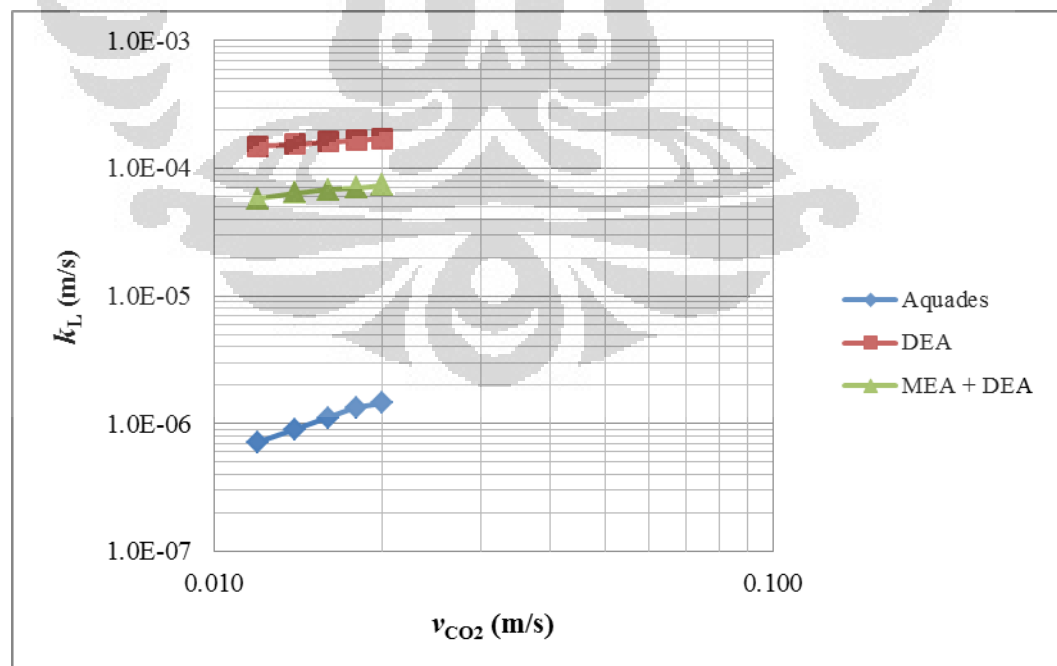
Pelarut	Terendah	Tertinggi
Air	4.1×10^{-5}	1.3×10^{-3}
NaOH	1.7	5.6
DEA	3.7	11.2



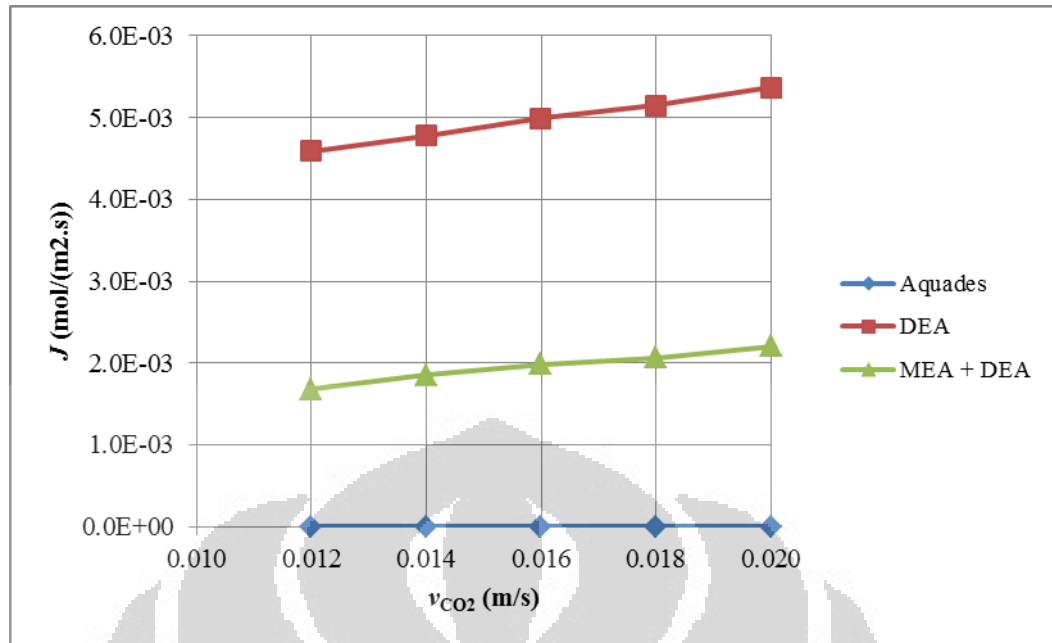
Gambar 4.9 Pengaruh jenis pelarut terhadap koefisien pindah massa, k_L , untuk $N = 20$



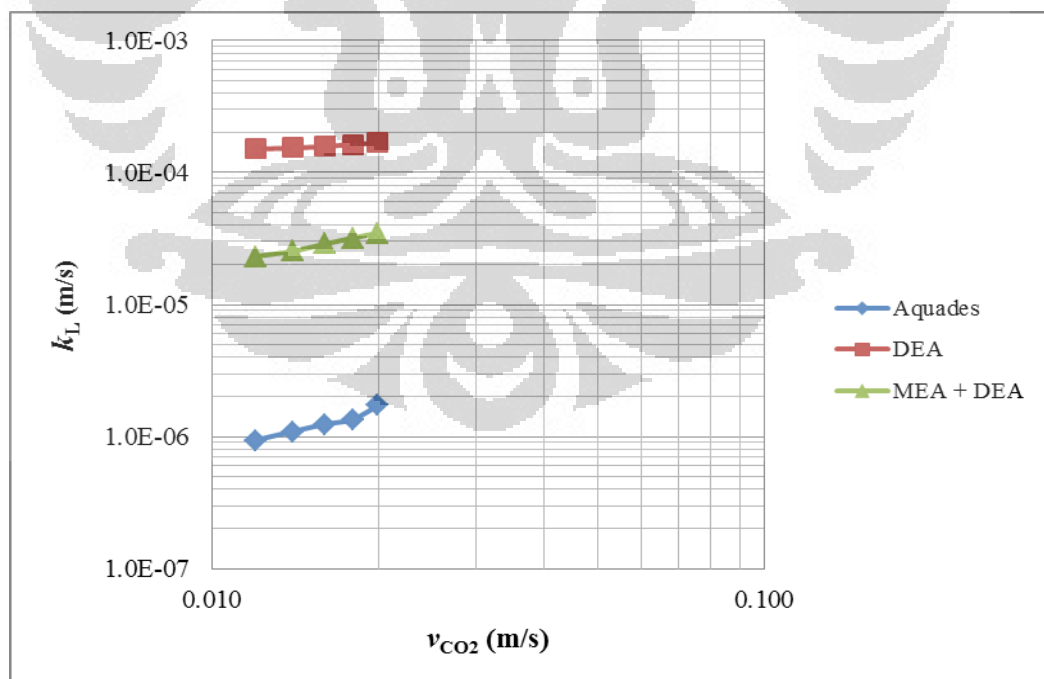
Gambar 4.10 Pengaruh jenis pelarut terhadap fluks perpindahan massa, J , untuk $N = 20$



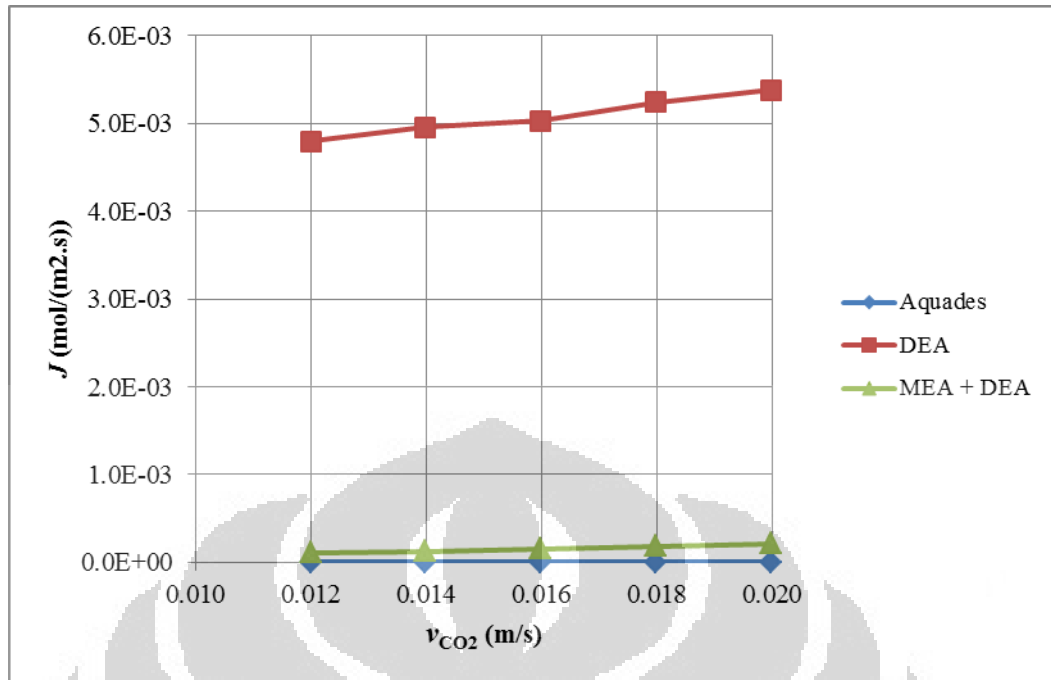
Gambar 4.11 Pengaruh jenis pelarut terhadap koefisien pindah massa, k_L , untuk $N = 30$



Gambar 4.12 Pengaruh jenis pelarut terhadap fluks perpindahan massa, J , untuk $N = 30$



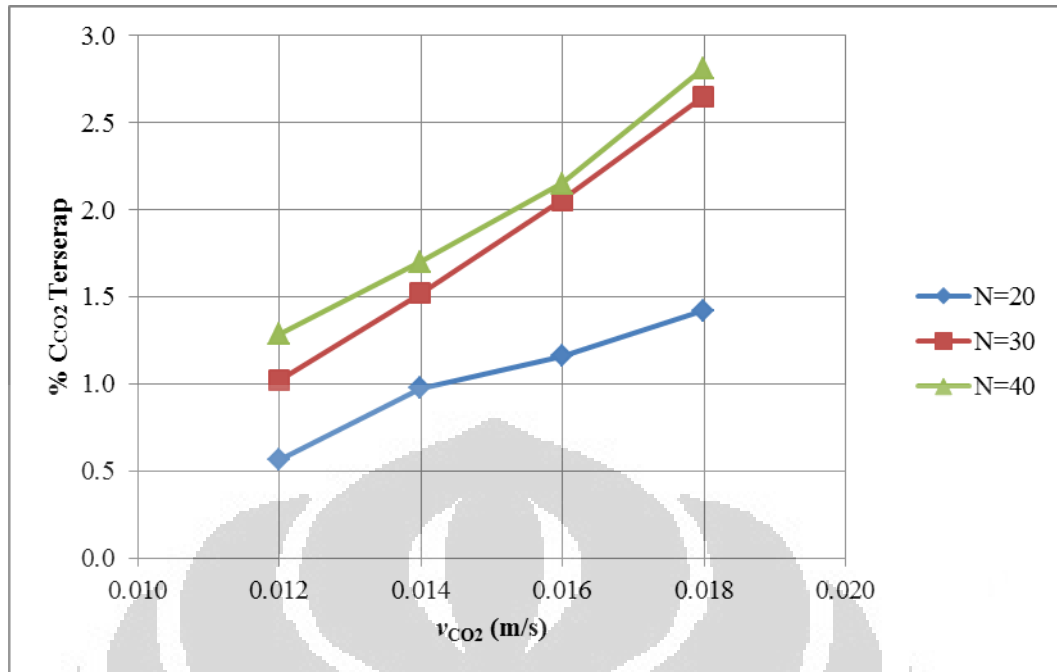
Gambar 4.13 Pengaruh jenis pelarut terhadap koefisien pindah massa, k_L , untuk $N = 40$



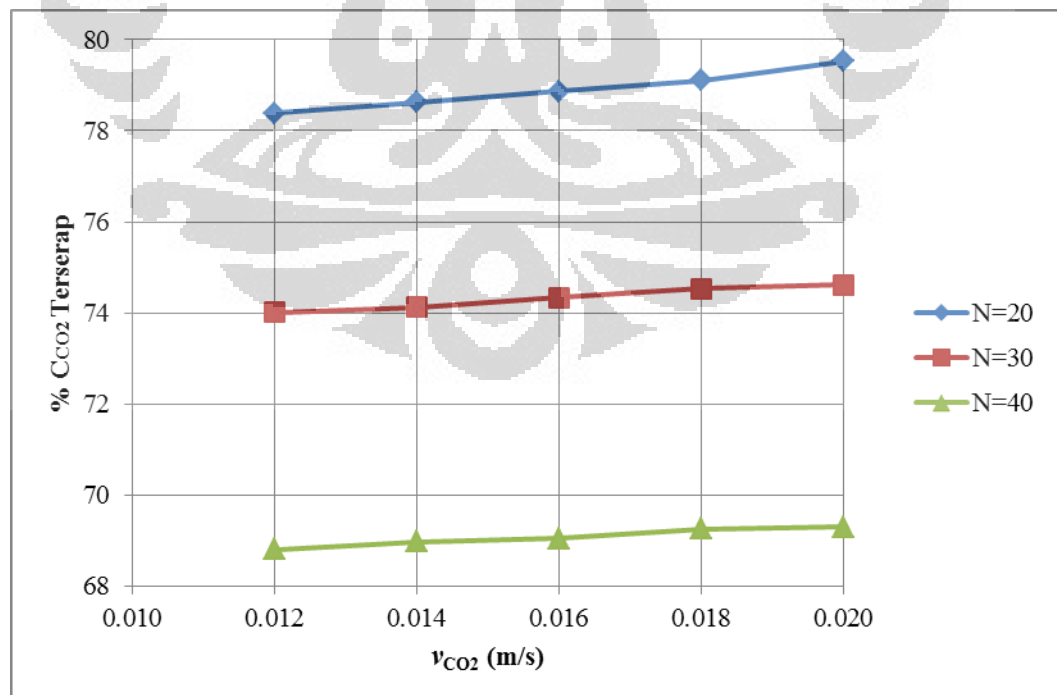
Gambar 4.14 Pengaruh jenis pelarut terhadap fluks perpindahan massa, J , untuk $N = 40$

4.2. Persentase (%) Konsentrasi Gas CO_2 Yang Terabsorp Ke Dalam Pelarut

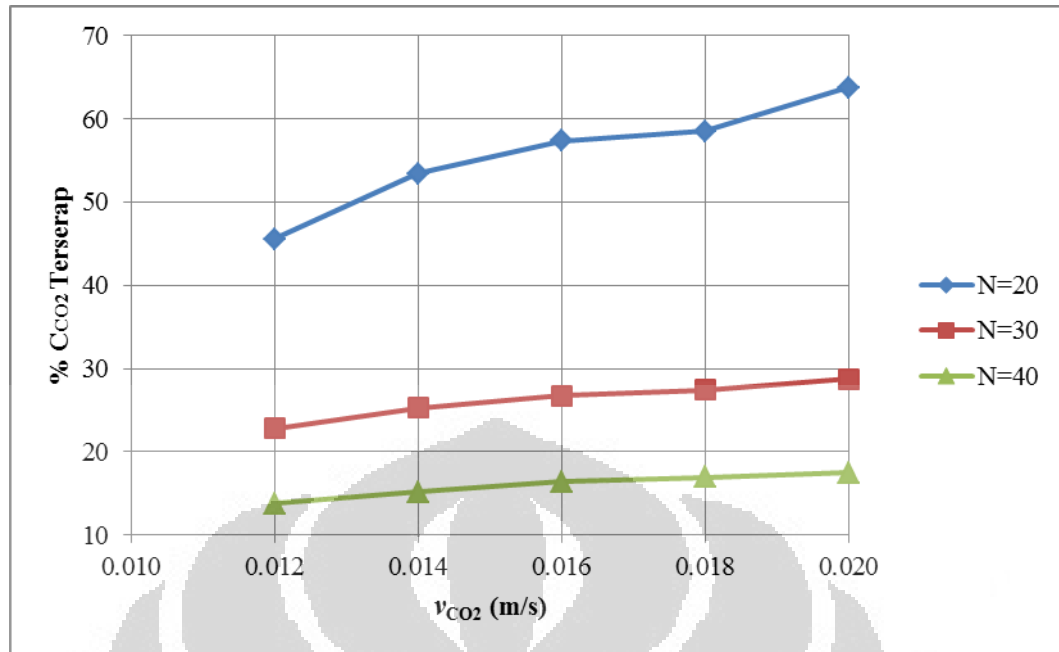
Pada absorpsi gas CO_2 ke dalam pelarut (absorben), baik pelarut aquades maupun senyawa amina, tidak semua gas CO_2 terabsorp ke dalam pelarut tersebut. Berdasarkan hasil percobaan pengaruh laju alir gas CO_2 , jumlah serat, dan jenis pelarut, ketiga variabel tersebut mempengaruhi seberapa banyak jumlah CO_2 yang terabsorp ke dalam absorben. Laju alir gas CO_2 yang semakin tinggi dan jumlah serat yang sedikit dalam modul menyebabkan jumlah gas CO_2 yang terabsorp ke dalam absorben semakin banyak. Jenis pelarut juga mempengaruhi kuantitas CO_2 yang terserap. Hasil percobaan menunjukkan bahwa pelarut DEA mengabsorp lebih banyak gas CO_2 daripada pelarut campuran MEA-DEA dan aquades. Hal ini ditunjukkan dengan hasil perhitungan persentase konsentrasi CO_2 yang diserap oleh setiap pelarut untuk setiap jumlah serat dalam modul pada bagian lampiran (Lampiran C.1 hingga C.3). Gambar 4.15 hingga 4.20 pada halaman berikutnya adalah grafik yang menjelaskan seberapa banyak gas CO_2 yang terserap dalam modul (dalam persen) untuk setiap jumlah serat dan jenis pelarut.



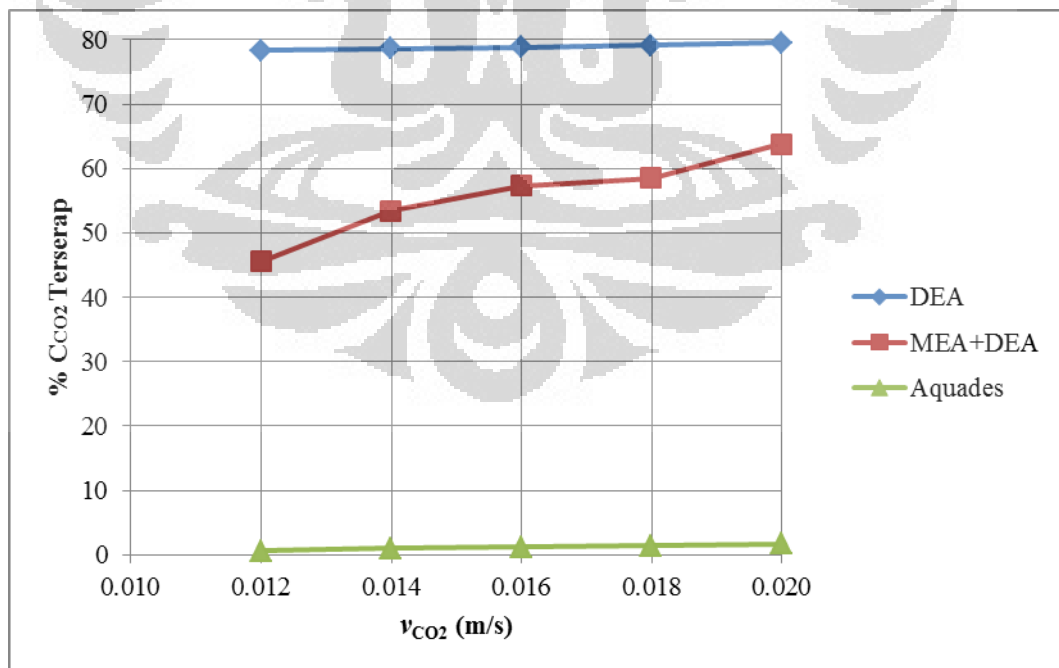
Gambar 4.15 Persentase CO₂ yang terabsorpsi ke dalam Aquades untuk setiap jumlah serat



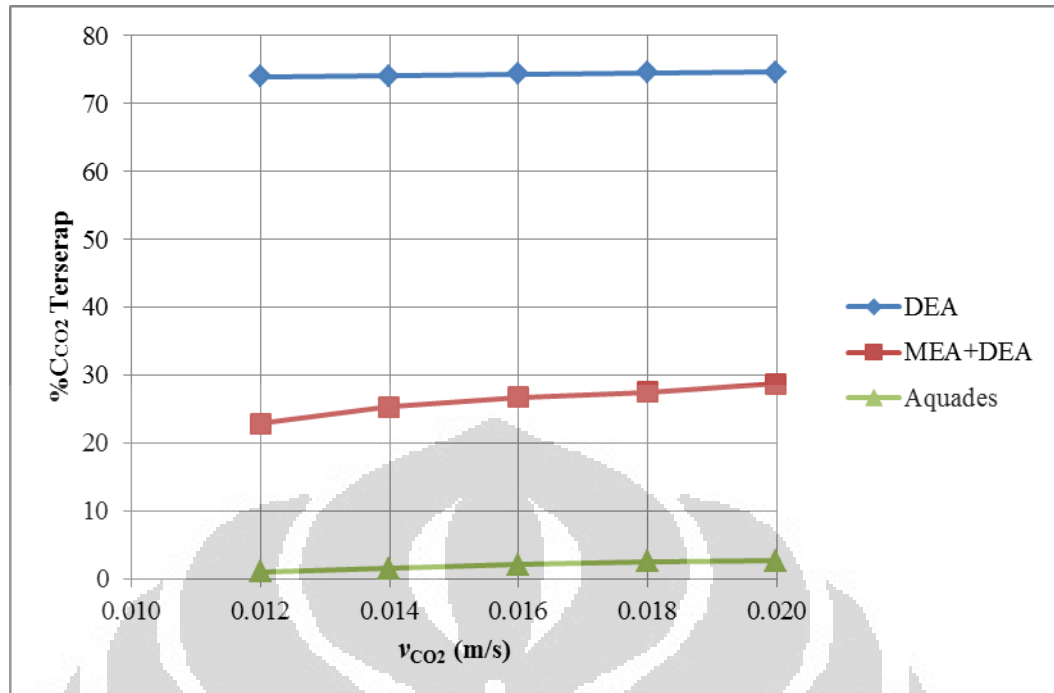
Gambar 4.16 Persentase CO₂ yang terabsorpsi ke dalam DEA untuk setiap jumlah serat



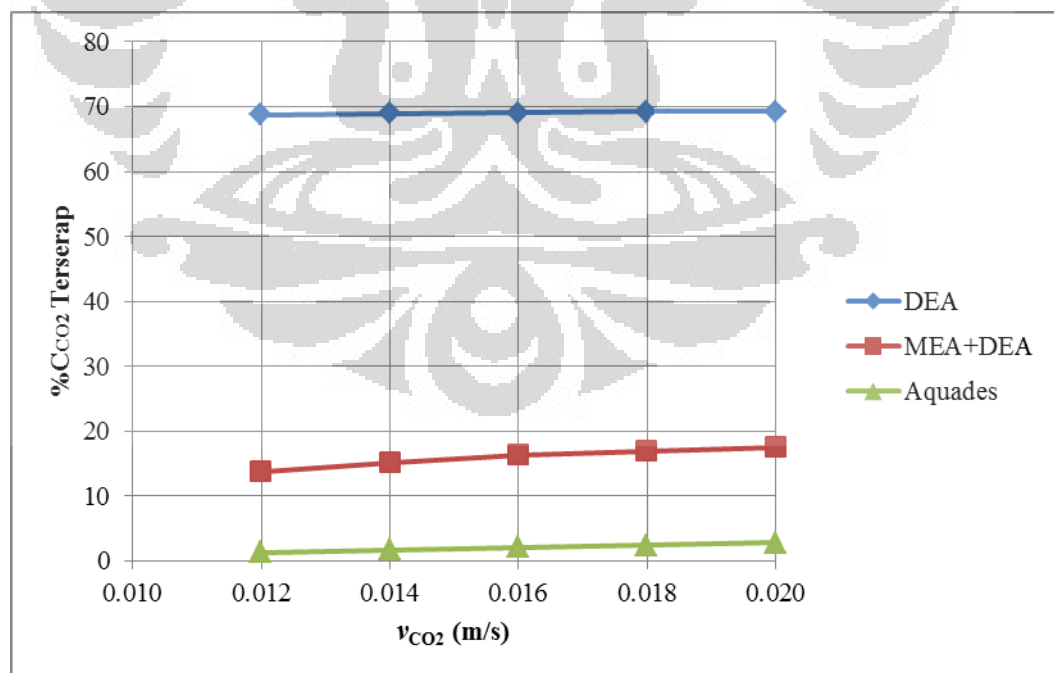
Gambar 4.17 Persentase CO_2 yang terabsorpsi ke dalam campuran MEA dan DEA untuk setiap jumlah serat



Gambar 4.18 Persentase CO_2 yang terabsorpsi ke dalam setiap absorbent untuk jumlah serat 20



Gambar 4.19 Persentase CO_2 yang terabsorpsi ke dalam setiap absorbent untuk jumlah serat 30



Gambar 4.20 Persentase CO_2 yang terabsorpsi ke dalam setiap absorbent untuk jumlah serat 40

4.3. Korelasi Perpindahan Massa

Koefisien perpindahan massa dapat dihubungkan dengan pengaruh jenis aliran melalui suatu korelasi antara fungsi bilangan Sherwood (Sh) terhadap bilangan Reynold (Re). Bilangan Sherwood adalah bilangan tak berdimensi yang menunjukkan besarnya koefisien perpindahan massa terhadap difusivitas CO_2 pada pelarut. Sedangkan, bilangan Reynold adalah bilangan yang menunjukkan jenis aliran. Korelasi perpindahan massa dengan bilangan Sherwood dapat dihubungkan dengan persamaan berikut:

$$Sh = k_l \frac{d_e}{D} \quad (4.2)$$

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa terdapat hubungan antara bilangan Sh dan koefisien perpindahan massa. Bilangan Sh juga merupakan fungsi dari diameter ekivalen dan difusivitas CO_2 ke dalam pelarut. Bilangan Sh juga memiliki fungsi untuk menunjukkan hubungan geometri modul membran dengan aliran dalam modul. Geometri membran ditunjukkan oleh besarnya fraksi kerapatan membran. Fraksi kerapatan membran ini berhubungan dengan faktor kekosongan.

Sedangkan, untuk bilangan Re dapat dihitung dengan persamaan berikut:

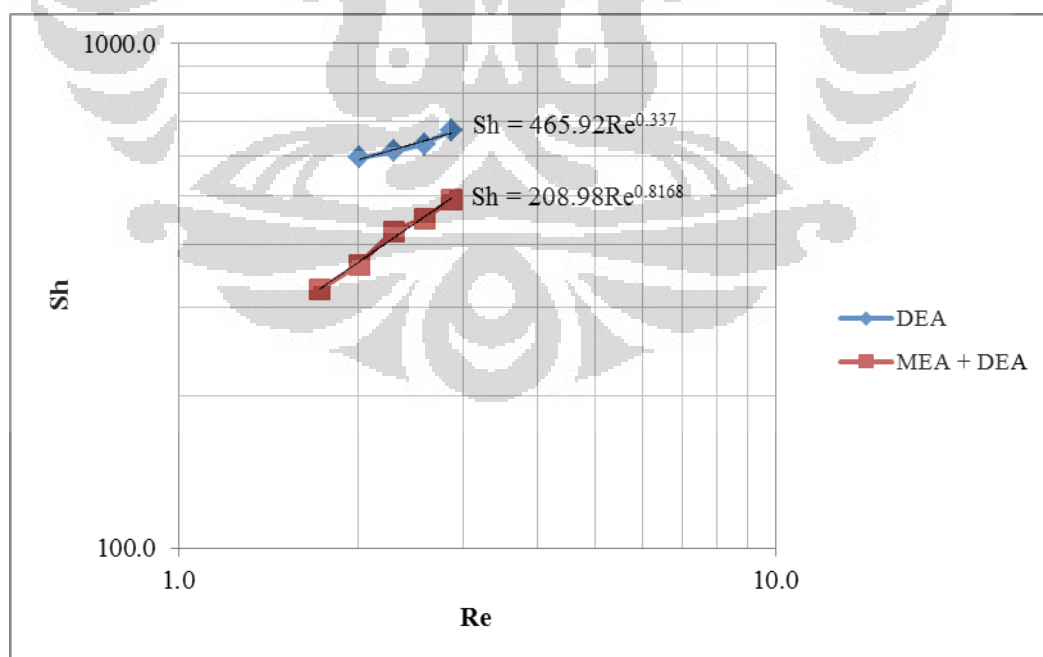
$$Re = \frac{d_e \rho v}{\mu} \quad (4.3)$$

Perhitungan bilangan Re dilakukan untuk setiap variasi laju alir gas CO_2 dan jumlah serat. Karena pada penelitian kali ini lebih terfokus pada variasi laju alir gas CO_2 , maka pada perhitungan bilangan Re digunakan sifat-sifat fisik gas CO_2 (densitas dan viskositas).

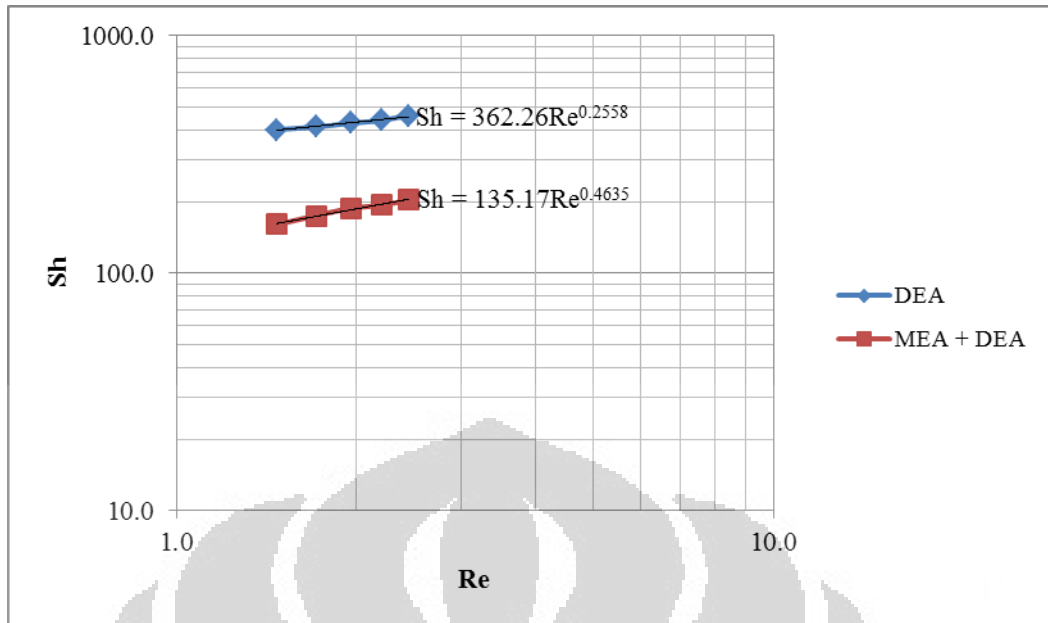
Berdasarkan grafik yang dihasilkan, terlihat bahwa kenaikan bilangan Re menyebabkan bilangan Sh juga mengalami kenaikan. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi bilangan Re maka aliran gas yang terjadi di dalam modul semakin ke arah turbulen. Hal ini mengakibatkan efektifitas perpindahan massa-nya pun semakin baik yang ditunjukkan dengan kenaikan bilangan Sh . Semakin tinggi bilangan Sh maka semakin besar koefisien perpindahan massa-nya.

Bilangan Sh dan Re dihubungkan dengan menggunakan grafik pangkat (*Trendline Power*) untuk setiap laju alir dan jenis pelarut. Sesuai literature, kondisi laminar terjadi untuk nilai pangkat Re (b) ≤ 0.5 . Sedangkan, nilai pangkat

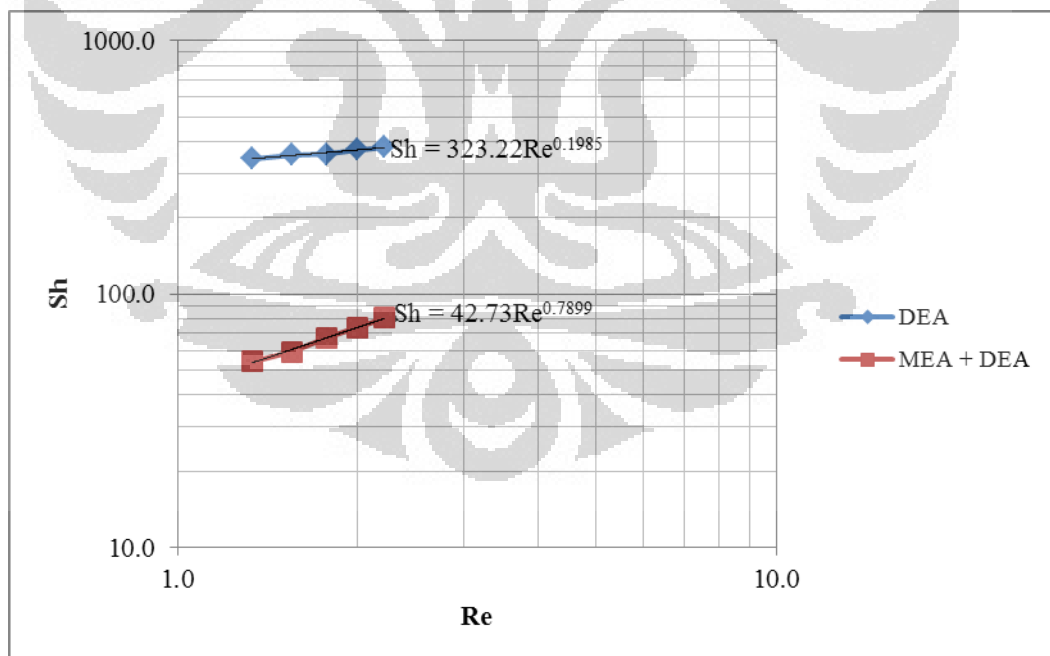
Re yang berada antara 0.6 – 1 didominasi oleh aliran turbulen. Nilai b yang diperoleh pada **penelitian ini** untuk **pelarut DEA** adalah **0.2638 ~ 0.3**. Sedangkan, pada penelitian absorpsi gas CO₂ dengan pelarut DEA yang dilakukan oleh **Anggara dan Subihi**, nilai b yang didapatkan sebesar **0.52433 ~ 0.5** (Anggara dan Subihi, 2007). Pada jumlah serat 20, 30, dan 40, nilai b yang diperoleh pada penelitian ini untuk masing-masing serat adalah 0.58, 0.36, dan 0.5. Hal ini menandakan bahwa pada jumlah serat 20, aliran yang terjadi bersifat turbulen. Hasil perhitungan bilangan Re juga menunjukkan nilai Re untuk jumlah serat 20 menempati urutan tertinggi, yang menunjukkan bahwa aliran cenderung ke arah turbulen. Pada jumlah serat 30 dan 40, bilangan Re yang dihasilkan sesuai dengan nilai Re (b), dimana aliran memang bersifat laminar. Pada aliran turbulen, koefisien dan fluks pindah massa nya lebih tinggi dari aliran laminar karena pada aliran turbulen distribusi gas yang terjadi pada modul lebih merata. Hal ini turut membuktikan bahwa jumlah serat 20 lebih efektif dalam meng-absorp CO₂. Gambar 4.21 hingga 4.23 adalah grafik-grafik yang menunjukkan hubungan antara bilangan Sh dan Re untuk setiap pelarut dan jumlah serat yang dihubungkan dengan menggunakan *Power Trendline*.



Gambar 4.21 Hubungan antara bilangan Sh dan Re untuk jumlah serat 20



Gambar 4.22 Hubungan antara bilangan Sh dan Re untuk jumlah serat 30



Gambar 4.23 Hubungan antara bilangan Sh dan Re untuk jumlah serat 40

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada modul yang sama, peningkatan linear laju alir gas CO₂ menyebabkan kenaikan nilai koefisien dan fluks perpindahan massa. Hal ini berarti bahwa pada laju alir gas umpan yang tinggi, perpindahan massa yang terjadi efektif.
2. Jumlah serat yang semakin banyak pada laju alir gas CO₂ yang sama akan menurunkan efektifitas perpindahan massa pada modul karena turunnya nilai koefisien dan fluks perpindahan massa.
3. Diethanolamine (DEA) sebagai pelarut tunggal adalah absorben yang efektif dalam menyerap gas CO₂ dibandingkan aquades dan campuran MEA-DEA.
4. Peningkatan bilangan Re akan menyebabkan kenaikan bilangan Sh dimana koefisien dan fluks perpindahan massa juga semakin naik.
5. Proses absorpsi gas CO₂ dengan menggunakan absorben DEA melalui kontaktor membran serat berongga dengan laju alir gas umpan yang tinggi dan jumlah serat yang sedikit adalah salah satu alternatif teknologi yang efektif untuk pemisahan atau penyisihan gas CO₂ (*CO₂ removal*).

Ada-pun saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Melakukan penelitian lanjutan yang terfokus pada laju alir pelarut dan pengaruh hidrodinamika pelarut dalam membran terhadap efektifitas perpindahan massa.
2. Melakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan pelarut tunggal MEA dan MDEA dan pelarut campuran MDEA-DEA.
3. Melakukan penelitian lanjutan dengan menjadikan komposisi absorben pada absorben campuran menjadi variabel bebasnya.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Bullin, Jerry dan John C. Polasek, 2001. "The Use of MDEA and Mixtures of Amines for Bulk CO₂ Removal". Bryan Research & Engineering, Inc.
- Al-Marzouqi; Muftah H. El-Naas; Sayed A.M. Marzouk; Mohamed A. Al-Zarooni; Nadia Abdullatif; Rami Faiz, 2007. "Modeling of CO₂ absorption in membrane contactors". *Journal of Membrane Science*, 59: 286-293.
- A. Pray, H.; C.C. Schweickert; dan B.H. Minnich, 1952. "Chemical Properties of Amine Compunds". *Ind. Eng. Chem.*, 44.
- Astarita, G.; D.W. Savage; A. Bisio, 1983. "Gas Treating with Chemical Solvents". New York: Wiley.
- 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". *Chem. Eng. Sci.*, 39: 1753.
- Bird, R. Byron, et.al, 1960. "Transport Phenomena". (USA: John Wiley & Sons).
- C., Yu. W. dan G. Astarita, 1985. "Kinetics of carbon dioxide absorption in solutions of methyldiethanolamine". *Chem. Eng. Sci.*, 40: 1753.
- Dortmundt, D. dan Doshi Kishore, 1999. "Recent Development in CO₂ Removal Membrane Technology". *UOP Journal*.
- Fessenden, 1986. "Kimia Organik Jilid 1". (Jakarta: Erlangga).
- Frauenkron, Matthias; Johann-Peter Melder; Günther Ruider; Roland Rossbacher; Hartmut Höke, 2002. "Ethanolamines and Propanolamines". (Wiley-VCH: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry).
- Gabelman, A. dan Sun-Tak Hwang, 1999. "Hollow Fiber Membrane Contactors". *Journal of Membrane Science*, 159: 61-106.

- Gong, Yanwen; Zhi Wang; Shichang Wang, 2006. "Experiments and simulation of CO₂ removal by mixed amines in a hollow fiber membrane module". Chemical Engineering and Processing.
- Hafizullah, Ahmad, 2011. "Polipropilena".
- Huntsman, 2007. "Methyldiethanolamine (MDEA)". (The Woodlands: Huntsman Corporation).
- Jian-gang, Lu; Cheng Min-dong, Ji Yan, Zhang Hui, 2009. "Membrane-based CO₂ absorption into blended amine solutions". Journal of Fuel Chemistry And Technology, 37: 6.
- Katz, R. Koyashi dan D.L., 1953. "Characteristic of Amine Compound". Ind. Eng. Chem., 45.
- Kim, Young-Seok dan Seung-Man Yang, 2000. "Absorption of carbon dioxide through hollow fiber membranes using various aqueous absorbents". Separation and Purification Technology.
- Kresser, T.O.J., 1960. "Polypropylene". (New York: Reinhold).
- Li, Jing-Liang dan Bing-Hung Chen, 2005. "Review of CO₂ absorption using chemical solvent in hollow fiber membrane contactors". Elsevier, Separation and Purification Technology, 41: 109-122.
- Lin, Su-Hsia; Kuo-Lun Tung; Wei-Jie Chen; Hao-Wei Chang, 2009. "Absorption of carbon dioxide by mixed piperazine-alkanolamine absorbent in a plasma-modified polypropylene hollow fiber contactor". Elsevier, Journal of Membrane Science, 333: 30-37.
- Matsumiya, Norifumi; Masaaki Teramoto; Satoshi Kitada; Hideto 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". Journal of Separation and Purification Technology.

- Modigell, Michael; Matthias Schumacher; Vladimir V. Teplyakov; Viktor B. Zenkevich, 2007. "A membrane contactor for efficient CO₂ removal in biohydrogen production". *Desalination*.
- Perry, R.H., 1997. "Perry's Chemical Engineers Handbook (7th Edition)". (New York: McGraw-Hill).
- Prawira, Sutisna, 2008. "Perkiraan Realisasi Sektor ESDM Terhadap Penerimaan Negara 2008 Sebesar Rp. 346,347 T". (Jakarta: Humas KESDM RI).
- Rangwala, Huseni A., 1995. "Absorption of carbon dioxide into aqueous solutions using hollow fiber membrane contactors". *Journal of Membrane Science*.
- Rubin, I.I., 1992. "Polypropylene". *Handbook of Plastic Materials and Technology*.
- Shuo, Xu; Y.W. Wang; F.D. Otto; A.E. Mather, 1996. *Chem. Eng. Sci.*
- Tartar, R. E. R. V. S. H. V., 1940. "Some Properties of Monoethanolamine and its Aqueous Solutions". *Journal of the American Chemical Society*.
- Treybal, Robert E., 1981. "Mass-Transfer Operations Third Edition". (Tokyo: McGraw-Hill International Book Company).
- Wang, R.; D.F. Li; C. Zhou; M. Liu; D.T. Liang, 2003. "Impact of DEA solutions with and without CO₂ loading on porous polypropylene membranes intended for use as contactors". *Journal of Membrane Science*.
- Williams, M., 2002. "The United Nations Environment Programme (UNEP) and the United Nations Framework Convention on Climate Change". *Climate change: information kit* (Geneva: UNFCCC).

LAMPIRAN A

DATA PENELITIAN

A.1. Studi Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Aquades

A.1.1. Data Perpindahan Massa Untuk Pelarut Aquades Dengan Jumlah Serat 20

Laju Alir Gas CO ₂ (cm ³ /min)	Data 1		Data 2		Data 3	
	pH	T(°C)	pH	T(°C)	pH	T(°C)
Awal	5.10	31.00	5.10	31.00	4.90	31.00
300	4.63	31.50	4.70	31.20	4.63	31.50
350	4.51	31.50	4.65	31.20	4.59	31.00
400	4.50	31.00	4.58	31.00	4.53	31.00
450	4.45	31.10	4.55	31.10	4.40	31.50
500	4.41	31.00	4.50	31.00	4.38	31.10

A.1.2. Data Perpindahan Massa Untuk Pelarut Aquades Dengan Jumlah Serat 30

Laju Alir Gas CO ₂ (cm ³ /min)	Data 1		Data 2		Data 3	
	pH	T(°C)	pH	T(°C)	pH	T(°C)
Awal	5.01	31.00	4.99	31.00	5.02	31.00
300	4.50	31.50	4.43	31.30	4.36	31.30
350	4.43	31.20	4.41	31.00	4.35	31.00
400	4.37	31.10	4.38	31.20	4.30	31.10
450	4.33	31.00	4.35	31.00	4.28	31.00
500	4.32	31.00	4.33	31.00	4.25	31.20

A.1.3. Data Perpindahan Massa Untuk Pelarut Aquades Dengan Jumlah Serat 40

Laju Alir Gas CO ₂ (cm ³ /min)	Data 1		Data 2		Data 3	
	pH	T(°C)	pH	T(°C)	pH	T(°C)
Awal	5.00	31.00	5.10	31.00	5.11	31.30
300	4.45	31.50	4.35	31.30	4.20	31.50
350	4.40	31.30	4.32	31.00	4.19	31.50
400	4.36	31.10	4.30	31.00	4.18	31.30
450	4.31	31.50	4.29	31.10	4.15	31.50
500	4.28	31.50	4.25	31.20	4.10	31.10

A.2. Studi Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Diethanolamine (DEA)

A.2.1. Data Perpindahan Massa Untuk Pelarut DEA Dengan Jumlah Serat 20

Laju Alir Gas CO ₂ (cm ³ /min)	Data 1		Data 2		Data 3	
	pH	T(°C)	pH	T(°C)	pH	T(°C)
Awal	11.10	33.00	10.95	34.00	10.89	33.00
300	10.90	33.50	10.61	34.50	10.30	33.50
350	10.64	34.00	10.49	34.00	10.29	33.00
400	10.62	34.00	10.47	33.50	10.28	33.00
450	10.60	33.50	10.45	34.00	10.27	33.00
500	10.57	33.50	10.39	33.80	10.25	33.00

A.2.2. Data Perpindahan Massa Untuk Pelarut DEA Dengan Jumlah Serat 30

Laju Alir Gas CO ₂ (cm ³ /min)	Data 1		Data 2		Data 3	
	pH	T(°C)	pH	T(°C)	pH	T(°C)
Awal	10.85	32.00	10.88	32.00	10.87	32.00
300	10.35	32.50	10.18	32.50	10.13	32.30
350	10.31	32.00	10.16	32.50	10.12	32.00
400	10.27	32.20	10.14	32.00	10.10	32.10
450	10.25	32.00	10.12	32.00	10.08	32.00
500	10.22	32.10	10.08	32.30	10.07	32.00

A.2.3. Data Perpindahan Massa Untuk Pelarut DEA Dengan Jumlah Serat 40

Laju Alir Gas CO ₂ (cm ³ /min)	Data 1		Data 2		Data 3	
	pH	T(°C)	pH	T(°C)	pH	T(°C)
Awal	10.88	31.00	10.85	31.00	10.88	31.00
300	10.25	31.50	9.93	31.50	9.82	31.30
350	10.23	31.30	9.89	31.80	9.80	31.50
400	10.22	31.80	9.87	31.30	9.79	31.00
450	10.20	31.50	9.80	31.30	9.77	31.20
500	10.17	31.30	9.78	31.30	9.75	31.00

A.3. Studi Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Campuran Monoethanolamine (MEA) dan Diethanolamine (DEA)

A.3.1. Data Perpindahan Massa Untuk Pelarut MEA-DEA Dengan Jumlah Serat 20

Laju Alir Gas CO ₂ (cm ³ /min)	Data 1		Data 2		Data 3	
	pH	T(°C)	pH	T(°C)	pH	T(°C)
Awal	11.44	35.00	11.03	34.00	10.95	35.00
300	10.94	35.50	10.86	34.50	10.82	35.50
350	10.90	34.50	10.81	34.00	10.80	34.00
400	10.83	34.80	10.78	34.00	10.75	34.50
450	10.79	35.00	10.77	34.00	10.74	34.00
500	10.77	34.80	10.72	34.00	10.70	34.50

A.3.2. Data Perpindahan Massa Untuk Pelarut MEA-DEA Dengan Jumlah Serat 30

Laju Alir Gas CO ₂ (cm ³ /min)	Data 1		Data 2		Data 3	
	pH	T(°C)	pH	T(°C)	pH	T(°C)
Awal	11.13	33.00	10.88	33.00	10.85	33.00
300	10.74	34.00	10.71	33.50	10.66	33.30
350	10.72	33.00	10.68	33.00	10.63	33.20
400	10.70	34.00	10.66	33.30	10.62	33.00
450	10.69	34.00	10.65	33.00	10.61	33.00
500	10.67	33.80	10.63	33.20	10.60	33.30

A.3.3. Data Perpindahan Massa Untuk Pelarut MEA-DEA Dengan Jumlah Serat 40

Laju Alir Gas CO ₂ (cm ³ /min)	Data 1		Data 2		Data 3	
	pH	T(°C)	pH	T(°C)	pH	T(°C)
Awal	10.80	32.80	10.75	32.00	10.69	31.50
300	10.66	33.00	10.60	32.80	10.58	32.50
350	10.64	33.00	10.59	32.50	10.57	32.00
400	10.62	33.00	10.57	32.00	10.55	32.00
450	10.61	32.50	10.55	32.30	10.53	32.00
500	10.60	32.80	10.52	32.00	10.52	32.50

LAMPIRAN B

CONTOH PERHITUNGAN

B.1. Perhitungan Studi Perpindahan Massa Dan Korelasi Perpindahan Massa Untuk Pelarut Aquades

Dalam perhitungan koefisien perpindahan massa, baik untuk absorpsi CO₂ menggunakan aquades, DEA, maupun campuran MEA-DEA digunakan persamaan :

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

Dimana $A = n \pi d_f L$

Untuk menghitung koefisien perpindahan massa pada pelarut aquades, diperlukan beberapa persamaan yang harus digunakan.

Reaksi antara CO₂ dengan air dijabarkan dengan persamaan reaksi berikut :



Sehingga persamaan untuk konstanta kesetimbangan CO₂ menjadi :

$$K_{a_{\text{CO}_2}} = \frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{\text{CO}_2}$$

Berdasarkan literature yang diperoleh dari Perry's Che Handbook 8th.ed, konstanta kesetimbangan CO₂ untuk air dapat menggunakan persamaan berikut :

$$\ln \frac{K_{\text{CO}_2}}{K_{\text{CO}_2,0}} = A_k \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_k \ln \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

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

Jumlah serat	= 20	Q _L	= 0.17 L/min
pH awal	= 5.10	pH akhir	= 4.63
T awal	= 31°C = 304.15 K	T akhir	= 31.5°C = 304.65 K

K_{CO2} pada suhu 25°C = 4.38 x 10⁻⁷ mol/L

B.1.1. Menghitung Konstanta Keseimbangan (K_{CO_2})

Berdasarkan data-data penelitian di atas, konstanta keseimbangan CO_2 dapat dihitung dengan persamaan ini :

$$\ln \frac{K_{CO_2}}{K_{CO_2,0}} = A_k \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) + B_k \ln \left(\frac{T}{T_0} \right)$$

$$\ln \frac{K_{CO_2}}{4.38 \times 10^{-7}} = 40.557 \left(1 - \frac{298.15}{304.65} \right) + 36.782 \ln \left(\frac{304.65}{298.15} \right)$$

$$\ln \frac{K_{CO_2}}{4.38 \times 10^{-7}} = 1.533$$

$$K_{CO_2} = 2.029 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$$

B.1.2. Menghitung $[CO_2]_0$ Untuk pH Awal Aquades = 5.10

$$[CO_2] = [H_2CO_3] = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{K_{aCO_2}}$$

- Menghitung $[H^+]_0$

$$[H^+]_0 = 10^{-pH}$$

$$[H^+]_0 = 10^{-5.10}$$

$$[H^+]_0 = 0.00000794 \text{ mol/L}$$

- Menghitung $[CO_2]_0$

$$[CO_2]_0 = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{K_{aCO_2}}$$

$$[CO_2]_0 = \frac{[7.94 \times 10^{-6}]^2}{2.029 \times 10^{-6}}$$

$$[CO_2]_0 = 3.11 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$$

B.1.3. Menghitung $[CO_2]_t = (C_1)$ Untuk pH = 4.63

- Menghitung $[H^+]_t$

$$[H^+]_t = 10^{-pH}$$

$$[H^+]_t = 10^{-4.63}$$

$$[H^+]_t = 0.0000234 \text{ mol/L}$$

- Menghitung $[CO_2]_t$

$$[CO_2]_t = \frac{[H^+][HCO_3^-]}{K_{a_{CO_2}}}$$

$$[CO_2]_t = \frac{[2.34 \times 10^{-5}]^2}{2.029 \times 10^{-6}}$$

$$[CO_2]_t = 2.389 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$$

B.1.4. Menghitung Solubility Gas CO_2 Murni Dalam Air (C^*)

$$k_H = 0.036 \exp\left(-2200\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^0}\right)\right)$$

$$k_H = 0.036 \exp\left(-2200\left(\frac{1}{304.65} - \frac{1}{298.15}\right)\right)$$

$$k_H = 0.04213815$$

$$C^* = \frac{k_H}{P} = \frac{0.04213815}{1} = 0.042138149 \text{ mol/L}$$

B.1.5. Menghitung Koefisien Perpindahan Massa Untuk Pelarut Aquades

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

Dimana,

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

$$Q_L = 0.17 \text{ L/min} = 2.833 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$k_L = \frac{2.833 \times 10^{-6}}{0.04} \ln \left[\frac{0.042138149 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0.0000311 \frac{\text{mol}}{\text{L}}}{0.042138149 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0.0002389 \frac{\text{mol}}{\text{L}}} \right]$$

$$k_L = 3.72 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$

B.1.6. Menghitung Fluks Perpindahan Massa (J) Untuk Pelarut Aquades

Fluks perpindahan massa dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$J = k_L \Delta C$$

$$J = \frac{3.72 \times 10^{-7} \text{ m}}{\text{s}} \times \left(0.0002389 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0.0000311 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) \times \left(\frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \right)$$

$$J = 7.73 \times 10^{-8} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

Penelitian dilakukan sebanyak tiga kali untuk setiap variasi laju alir gas CO₂ untuk tujuan keakuratan. Data yang diperoleh diolah masing-masing kemudian dirata-rata. Berikut adalah contoh hasil yang diperoleh untuk pengolahan data pada modul dengan jumlah serat sebanyak 20 dengan pelarut aquades :

Laju Alir Gas CO ₂ (cm ³ /min)	Q _L (L/min)	Data 1		Data 2		Data 3	
		k _L (m/s)	J (mol/(m ² ·s))	k _L (m/s)	J (mol/(m ² ·s))	k _L (m/s)	J (mol/(m ² ·s))
300	0.17	3.7E-07	7.7E-08	2.8E-07	4.4E-08	2.9E-07	4.6E-08
350	0.17	6.9E-07	2.6E-07	3.7E-07	7.5E-08	4.5E-07	1.1E-07
400	0.17	8.4E-07	3.9E-07	5.6E-07	1.7E-07	6.4E-07	2.2E-07
450	0.17	1.0E-06	6.0E-07	6.3E-07	2.2E-07	1.1E-06	6.7E-07
500	0.17	1.3E-06	9.3E-07	8.4E-07	3.9E-07	1.4E-06	1.0E-06

Laju Alir Gas CO ₂ (cm ³ /min)	Rata-rata	
	k _L (m/s)	J (mol/(m ² ·s))
300	4.9E-08	1.0E+02
350	1.1E-07	1.2E+02
400	2.2E-07	1.3E+02
450	4.6E-07	1.5E+02
500	7.4E-07	1.7E+02

Untuk setiap perhitungan variabel yang lain dilakukan hal yang sama.

B.1.7. Perhitungan Bilangan Sherwood (Sh)

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

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

Berikut adalah langkah-langkah perhitungan bilangan Sherwood :

1. Menghitung nilai ε (faktor kekosongan)

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

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

$$\varepsilon = 0.921875$$

2. Menghitung nilai diameter ekuivalen (d_e)

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

$$d_e = \frac{0.0015}{\sqrt{1 - 0.921875}}$$

$$d_e = 5.37 \times 10^{-3} \text{ m}$$

3. Menghitung nilai difusivitas (D)

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

Dimana,

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

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

T_1 = 25°C = 298.15 K

T_2 = suhu sampel = 31.5°C

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

μ_2 = viskositas pada suhu tertentu / sampel (cp)

Dari tabel Lampiran D, viskositas (μ_2) diperoleh dengan interpolasi pada $T_2 = 31.5^\circ\text{C}$.

$\mu = 0.7808 \text{ cp}$ (31°C)

$\mu = 0.7647 \text{ cp}$ (32°C)

$$\frac{32 - 31.5}{32 - 31} = \frac{0.7647 - \mu_2}{0.7647 - 0.7808}$$

$$\mu_2 = 0.77275 \text{ cp}$$

Maka nilai difusivitas :

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

$$\frac{1.96 \times 10^{-9} \times 298.15}{0.8904} = \frac{D_2 \times 304.65}{0.77275}$$

$$D_2 = 1.665 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

4. Menghitung Bilangan Sherwood (Sh)

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

$$Sh = 3.72 \times 10^{-7} \left(\frac{5.37 \times 10^{-3}}{1.665 \times 10^{-9}} \right)$$

$$Sh = 1.199196465$$

B.1.8. Perhitungan Bilangan Reynold (Re)

Perhitungan bilangan Reynold aliran gas CO₂ menggunakan persamaan berikut ini :

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

Menghitung kecepatan alir gas CO₂ :

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

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

Dimana,

$$Q_G = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_{flow} = \frac{1}{4} \times 3.14 \times ((0.024)^2 - (20 \times (0.0015)^2))$$

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

Sehingga,

$$V_G = \frac{5 \times 10^{-5}}{4.17 \times 10^{-4}}$$

$$V_G = 0.011995154 \text{ m/s}$$

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

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

$$Re = \frac{5.37 \times 10^{-3} \times 1.873 \times 0.011995154}{0.07 \times 10^{-3}}$$

$$Re = 1.7224309$$

B.2. Perhitungan Studi Perpindahan Massa Dan Korelasi Perpindahan Massa Untuk Pelarut Diethanolamine (DEA)

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

Jumlah serat	= 20	Q_L	= 0.17 L/min
pH awal	= 11.1	pH akhir	= 10.9
T awal	= $33^\circ\text{C} = 306.15 \text{ K}$	T akhir	= $33.5^\circ\text{C} = 306.65 \text{ K}$

Berdasarkan literatur, tetapan kesetimbangan basa (K_b) untuk DEA pada suhu antara $30^\circ\text{C} - 33^\circ\text{C} = 0.000008433 \text{ mol / L}$.

B.2.1. Menghitung Konsentrasi Larutan DEA Awal

pH awal larutan = 11.1

$\text{pOH} = 14 - \text{pH} = 14 - 11.1 = 2.9$

$[\text{OH}^-] = 10^{-(\text{pOH})} = 10^{-2.9}$

$[\text{OH}^-] = 0.0012589 \text{ mol / L}$

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

$$M_{DEA} = \frac{[\text{OH}^-]^2}{K_b}$$

$$M_{DEA} = \frac{[1.26 \times 10^{-3} \text{ mol/L}]^2}{8.433 \times 10^{-6} \text{ mol/L}} = 0.188 \text{ mol/L}$$

B.2.2. Menghitung Konsentrasi Larutan Sampel

pH akhir larutan = 10.9

pOH = 14 – pH = 14 – 10.9 = 3.1

$[OH^-] = 10^{-(pOH)} = 10^{-3.1}$

$[OH^-] = 0.000794 \text{ mol / L}$

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

$$M_{DEA} = \frac{[OH^-]^2}{K_b}$$

$$M_{DEA} = \frac{[7.94 \times 10^{-4} \text{ mol/L}]^2}{8.433 \times 10^{-6} \text{ mol/L}} = 0.0748 \text{ mol/L}$$

B.2.3. Menghitung Konsentrasi CO₂ Mula-mula

CO₂₍₀₎ = C₀ = 0 karena pada keadaan awal belum terdapat CO₂ yang diabsorp oleh DEA.

B.2.4. Menghitung Konsentrasi CO₂ Yang Terbentuk (CO₂₍₁₎ = C₁)

$$C_1 = \frac{1}{2} ([M_{DEA}]_{awal} - [M_{DEA}]_{akhir})$$

$$C_1 = \frac{1}{2} \left(0.188 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0.0748 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \right)$$

$$C_1 = 0.0566 \text{ mol/L}$$

B.2.5. Menghitung Konsentrasi CO₂ Dalam Keadaan Setimbang Dengan DEA (CO₂* = C*)

$$C^* = \frac{1}{2} [M_{DEA}]_{awal}$$

$$C^* = \frac{1}{2} \times 0.188 = 0.094 \text{ mol/L}$$

B.2.6. Menghitung Koefisien Perpindahan Massa Untuk Pelarut DEA

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

Dimana,

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

$$Q_L = 0.17 \text{ L/min} = 2.833 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$k_L = \frac{2.833 \times 10^{-6}}{0.04} \ln \left[\frac{0.094 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0}{0.094 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0.0566 \frac{\text{mol}}{\text{L}}} \right]$$

$$k_L = 6.92 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

B.2.7 Menghitung Fluks Perpindahan Massa (J) Untuk Pelarut DEA

Fluks perpindahan massa dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$J = k_L \Delta C$$

$$J = \frac{6.92 \times 10^{-5} \text{ m}}{\text{s}} \times \left(0.0566 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0 \right) \times \left(\frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \right)$$

$$J = 3.92 \times 10^{-3} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

B.2.8. Perhitungan Bilangan Sherwood (Sh)

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

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

Berikut adalah langkah-langkah perhitungan bilangan Sherwood :

1. Menghitung nilai ϵ (faktor kekosongan)

$$\epsilon = 1 - N_{fibre} \left(\frac{d_f}{D_{i, modul}} \right)^2$$

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

$$\epsilon = 0.921875$$

2. Menghitung nilai diameter ekivalen (d_e)

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

$$d_s = \frac{0.0015}{\sqrt{1 - 0.921875}}$$

$$d_s = 5.37 \times 10^{-3} \text{ m}$$

3. Menghitung nilai difusivitas (D)

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

Dimana,

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

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

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

T_2 = suhu sampel = $33.5^\circ\text{C} = 306.65 \text{ K}$

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

μ_2 = viskositas pada suhu tertentu / sampel (cp)

Dari tabel Lampiran D, viskositas (μ_2) diperoleh dengan interpolasi pada $T_2 = 33.5^\circ\text{C}$.

$\mu = 0.7491 \text{ cp}$ (33°C)

$\mu = 0.7340 \text{ cp}$ (34°C)

$$\frac{34 - 33.5}{34 - 33} = \frac{0.7340 - \mu_2}{0.7340 - 0.7491}$$

$$\mu_2 = 0.74155 \text{ cp}$$

Maka nilai difusivitas :

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

$$\frac{1.96 \times 10^{-9} \times 298.15}{0.8904} = \frac{D_2 \times 306.65}{0.74155}$$

$$D_2 = 1.59 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

4. Menghitung Bilangan Sherwood (Sh)

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

$$Sh = 6.92 \times 10^{-5} \left(\frac{5.37 \times 10^{-3}}{1.59 \times 10^{-9}} \right)$$

$$Sh = 234.183071$$

B.2.9. Perhitungan Bilangan Reynold (Re)

Perhitungan bilangan Reynold aliran gas CO₂ menggunakan persamaan berikut ini :

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

Menghitung kecepatan alir gas CO₂ :

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

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

Dimana,

$$Q_G = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_{flow} = \frac{1}{4} \times 3.14 \times ((0.024)^2 - (20 \times (0.0015)^2))$$

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

Sehingga,

$$V_G = \frac{5 \times 10^{-5}}{4.17 \times 10^{-4}}$$

$$V_G = 0.011995154 \text{ m/s}$$

Setelah nilai V_G diketahui, maka bilangan Re untuk gas CO₂ dengan laju alir 300 cm³/min pada modul dengan jumlah serat 20 dapat dihitung sebagai berikut :

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

$$Re = \frac{5.37 \times 10^{-3} \times 1.873 \times 0.011995154}{0.07 \times 10^{-3}}$$

$$Re = 1.722430899$$

B.3. Perhitungan Studi Perpindahan Massa Dan Korelasi Perpindahan Massa Untuk Pelarut Campuran MEA-DEA

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

Jumlah serat	= 20	Q_L	= 0.17 L/min
pH awal	= 11.44	pH akhir	= 10.94
T awal	= 35°C = 308.15 K	T akhir	= 35.5°C = 308.65 K

B.3.1. Menghitung Tetapan Keseimbangan Basa Campuran Untuk Pelarut Campuran MEA-DEA

Karena pelarut yang digunakan adalah pelarut campuran MEA dan DEA, maka nilai K_b yang digunakan pada perhitungan penentuan konsentrasi larutan ditentukan dengan persamaan berikut :

$$K_b \text{ MEA} = 3.16 \times 10^{-5} \text{ mol/L} \quad K_b \text{ DEA} = 8.433 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$$

Komposisi Larutan :

MEA = 33 % ; DEA = 67 % ; maka :

$$K_b = \frac{(0.33 \times 3.16 \times 10^{-5}) \text{ mol}}{L} + \frac{(0.67 \times 8.433 \times 10^{-6}) \text{ mol}}{L} = 1.6 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$$

B.3.2. Menghitung Konsentrasi Larutan MEA-DEA Awal

pH awal larutan = 11.44

$$pOH = 14 - pH = 14 - 11.44 = 2.56$$

$$[OH^-] = 10^{-(pOH)} = 10^{-2.56}$$

$$[OH^-] = 0.002754 \text{ mol / L}$$

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

$$M_{MEA/DEA} = \frac{[OH^-]^2}{K_b}$$

$$M_{MEA/DEA} = \frac{[2.754 \times 10^{-3} \text{ mol/L}]^2}{1.6 \times 10^{-5} \text{ mol/L}} = 0.4718 \text{ mol/L}$$

B.3.3. Menghitung Konsentrasi Larutan Sampel

pH akhir larutan = 10.94

pOH = 14 – pH = 14 – 10.94 = 3.06

$[OH^-] = 10^{-(pOH)} = 10^{-3.06}$

$[OH^-] = 0.000871 \text{ mol / L}$

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

$$M_{MEA/DEA} = \frac{[OH^-]^2}{K_b}$$

$$M_{MEA/DEA} = \frac{[8.71 \times 10^{-4} \text{ mol/L}]^2}{1.6 \times 10^{-5} \text{ mol/L}} = 0.0472 \text{ mol/L}$$

B.3.4. Menghitung Konsentrasi CO₂ Mula-mula

CO₂₍₀₎ = C₀ = 0 karena pada keadaan awal belum terdapat CO₂ yang diabsorp oleh MEA-DEA.

B.3.5. Menghitung Konsentrasi CO₂ Yang Terbentuk (CO₂₍₁₎ = C₁)

$$C_1 = \frac{1}{2} \left([M_{MEA/DEA}]_{awal} - [M_{MEA/DEA}]_{akhir} \right)$$

$$C_1 = \frac{1}{2} \left(0.4718 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0.0472 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \right)$$

$$C_1 = 0.212 \text{ mol/L}$$

B.3.6. Menghitung Konsentrasi CO₂ Dalam Keadaan Setimbang Dengan MEA-DEA (CO₂* = C*)

$$C^* = \frac{1}{2} [M_{MEA/DEA}]_{awal}$$

$$C^* = \frac{1}{2} \times 0.4718 \text{ mol} = 0.236 \text{ mol/L}$$

B.3.7. Menghitung Koefisien Perpindahan Massa Untuk Pelarut Campuran MEA-DEA

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

Dimana,

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

$$Q_L = 0.17 \text{ L/min} = 2.833 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$k_L = \frac{2.833 \times 10^{-6}}{0.04} \ln \left[\frac{0.236 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0}{0.236 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0.212 \frac{\text{mol}}{\text{L}}} \right]$$

$$k_L = 1.73 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

B.3.8. Menghitung Fluks Perpindahan Massa (J) Untuk Pelarut Campuran MEA-DEA

Fluks perpindahan massa dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$J = k_L \Delta C$$

$$J = \frac{1.73 \times 10^{-4} \text{ m}}{\text{s}} \times \left(0.212 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0 \right) \times \left(\frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \right)$$

$$J = 3.68 \times 10^{-2} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

B.3.9. Perhitungan Bilangan Sherwood (Sh)

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

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

Berikut adalah langkah-langkah perhitungan bilangan Sherwood :

1. Menghitung nilai ε (faktor kekosongan)

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

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

$$\varepsilon = 0.921875$$

2. Menghitung nilai diameter ekuivalen (d_e)

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

$$d_e = \frac{0.0015}{\sqrt{1 - 0.921875}}$$

$$d_e = 5.37 \times 10^{-3} \text{ m}$$

3. Menghitung nilai difusivitas (D)

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

Dimana,

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

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

T_1 = 25°C = 298.15 K

T_2 = suhu sampel = 35.5°C = 308.65 K

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

μ_2 = viskositas pada suhu tertentu / sampel (cp)

Dari tabel Lampiran D, viskositas (μ_2) diperoleh dengan interpolasi pada $T_2 = 35.5^\circ\text{C}$.

$\mu = 0.7194 \text{ cp}$ (35°C)

$\mu = 0.7052 \text{ cp}$ (36°C)

$$\frac{36 - 35.5}{36 - 35} = \frac{0.7052 - \mu_2}{0.7052 - 0.7194}$$

$$\mu_2 = 0.7124 \text{ cp}$$

Maka nilai difusivitas:

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

$$\frac{1.96 \times 10^{-9} \times 298.15}{0.8904} = \frac{D_2 \times 308.65}{0.7124}$$

$$D_2 = 1.51 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

4. Menghitung Bilangan Sherwood (Sh)

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

$$Sh = 1.73 \times 10^{-4} \left(\frac{5.37 \times 10^{-3}}{1.51 \times 10^{-9}} \right)$$

$$Sh = 613.3881$$

B.3.10. Perhitungan Bilangan Reynold (Re)

Perhitungan bilangan Reynold aliran gas CO₂ menggunakan persamaan berikut ini :

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

Menghitung kecepatan alir gas CO₂ :

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

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

Dimana,

$$Q_G = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_{flow} = \frac{1}{4} \times 3.14 \times ((0.024)^2 - (20 \times (0.0015)^2))$$

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

Sehingga,

$$V_G = \frac{5 \times 10^{-5}}{4.17 \times 10^{-4}}$$

$$V_G = 0.011995154 \text{ m/s}$$

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

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

$$Re = \frac{5.37 \times 10^{-3} \times 1.873 \times 0.011995154}{0.07 \times 10^{-3}}$$

$$Re = 1.722430899$$



LAMPIRAN C

HASIL PERHITUNGAN

C.1. Hasil Perhitungan Persentase (%) Gas CO₂ Yang Terserap Ke Dalam Pelarut Aquades

C.1.1. Modul Dengan Jumlah Serat 20

v_{CO_2} (m/s)	C_{in} (mol/L)	C_{out} (mol/L)	CO ₂ Terserap (mol/L)	% CO ₂ Terserap
0.012	0.0426	0.0423	0.00024	0.56
0.014	0.0426	0.0422	0.00042	0.98
0.016	0.0426	0.0421	0.00049	1.16
0.018	0.0426	0.0420	0.00061	1.42
0.020	0.0426	0.0418	0.00075	1.75

C.1.2. Modul Dengan Jumlah Serat 30

v_{CO_2} (m/s)	C_{in} (mol/L)	C_{out} (mol/L)	CO ₂ Terserap (mol/L)	% CO ₂ Terserap
0.012	0.0426	0.0421	0.00043	1.02
0.014	0.0426	0.0419	0.00065	1.52
0.016	0.0426	0.0417	0.00087	2.05
0.018	0.0426	0.0415	0.00108	2.53
0.020	0.0426	0.0414	0.00113	2.65

C.1.3. Modul Dengan Jumlah Serat 40

v_{CO_2} (m/s)	C_{in} (mol/L)	C_{out} (mol/L)	CO ₂ Terserap (mol/L)	% CO ₂ Terserap
0.012	0.0426	0.0420	0.00055	1.29
0.014	0.0426	0.0418	0.00072	1.70
0.016	0.0426	0.0417	0.00092	2.15
0.018	0.0426	0.0415	0.00104	2.45
0.020	0.0426	0.0414	0.00120	2.81

C.2. Hasil Perhitungan Persentase (%) Gas CO₂ Yang Terserap Ke Dalam Pelarut DEA (Diethanolamine)

C.2.1. Modul Dengan Jumlah Serat 20

v_{CO_2} (m/s)	C_{in} (mol/L)	C_{out} (mol/L)	CO ₂ Terserap (mol/L)	% CO ₂ Terserap
0.012	0.0426	0.0092	0.03337	78.38
0.014	0.0426	0.0091	0.03347	78.63
0.016	0.0426	0.0090	0.03357	78.87
0.018	0.0426	0.0089	0.03367	79.10
0.020	0.0426	0.0087	0.03385	79.52

C.2.2. Modul Dengan Jumlah Serat 30

v_{CO_2} (m/s)	C_{in} (mol/L)	C_{out} (mol/L)	CO ₂ Terserap (mol/L)	% CO ₂ Terserap
0.012	0.0426	0.0111	0.03150	74.01
0.014	0.0426	0.0110	0.03155	74.12
0.016	0.0426	0.0109	0.03164	74.34
0.018	0.0426	0.0108	0.03173	74.53
0.020	0.0426	0.0108	0.03176	74.62

C.2.3. Modul Dengan Jumlah Serat 40

v_{CO_2} (m/s)	C_{in} (mol/L)	C_{out} (mol/L)	CO ₂ Terserap (mol/L)	% CO ₂ Terserap
0.012	0.0426	0.01328	0.02929	68.80
0.014	0.0426	0.01321	0.02936	68.97
0.016	0.0426	0.01318	0.02939	69.04
0.018	0.0426	0.01309	0.02948	69.25
0.020	0.0426	0.01307	0.02950	69.30

C.3. Hasil Perhitungan Persentase (%) Gas CO₂ Yang Terserap Ke Dalam Pelarut Campuran MEA (Monoethanolamine) dan DEA (Diethanolamine)

C.3.1. Modul Dengan Jumlah Serat 20

v_{CO_2} (m/s)	C_{in} (mol/L)	C_{out} (mol/L)	CO ₂ Terserap (mol/L)	% CO ₂ Terserap
0.012	0.0426	0.02318	0.01938	45.54
0.014	0.0426	0.01983	0.02274	53.42
0.016	0.0426	0.01815	0.02441	57.35
0.018	0.0426	0.01765	0.02492	58.55
0.020	0.0426	0.01543	0.02714	63.76

C.3.2. Modul Dengan Jumlah Serat 30

v_{CO_2} (m/s)	C_{in} (mol/L)	C_{out} (mol/L)	CO ₂ Terserap (mol/L)	% CO ₂ Terserap
0.012	0.0426	0.03285	0.00972	22.82
0.014	0.0426	0.03180	0.01077	25.30
0.016	0.0426	0.03117	0.01140	26.78
0.018	0.0426	0.03088	0.01169	27.46
0.020	0.0426	0.03033	0.01224	28.74

C.3.3. Modul Dengan Jumlah Serat 40

v_{CO_2} (m/s)	C_{in} (mol/L)	C_{out} (mol/L)	CO ₂ Terserap (mol/L)	% CO ₂ Terserap
0.012	0.0426	0.03669	0.00588	13.82
0.014	0.0426	0.03611	0.00645	15.16
0.016	0.0426	0.03559	0.00698	16.39
0.018	0.0426	0.03535	0.00722	16.96
0.020	0.0426	0.03512	0.00745	17.51

C.4. Hasil Perhitungan Studi Perpindahan Massa Dan Korelasi Perpindahan Massa Untuk Pelarut Aquades

C.4.1. Modul Dengan Jumlah Serat 20

v_{CO_2} (m/s)	Q_L (L/min)	k_L (m/s)	J (mol/(m ² .s))	Re	Sh
0.012	0.17	0.0000003134	0.0000000557	1.722	1.008
0.014	0.17	0.0000005019	0.0000001502	2.010	1.609
0.016	0.17	0.0000006798	0.0000002620	2.297	2.165
0.018	0.17	0.0000009257	0.0000004976	2.584	2.967
0.020	0.17	0.0000011739	0.0000007879	2.871	3.743

C.4.2. Modul Dengan Jumlah Serat 30

v_{CO_2} (m/s)	Q_L (L/min)	k_L (m/s)	J (mol/(m ² .s))	Re	Sh
0.012	0.17	0.0000007201	0.0000004697	1.469	1.888
0.014	0.17	0.0000009044	0.0000006983	1.713	2.355
0.016	0.17	0.0000011154	0.0000010615	1.958	2.910
0.018	0.17	0.0000013341	0.0000014890	2.203	3.470
0.020	0.17	0.0000014430	0.0000017462	2.448	3.760

C.4.3. Modul Dengan Jumlah Serat 40

v_{CO_2} (m/s)	Q_L (L/min)	k_L (m/s)	J (mol/(m ² .s))	Re	Sh
0.012	0.17	0.0000009328	0.0000011900	1.331	2.123
0.014	0.17	0.0000010815	0.0000014741	1.553	2.454
0.016	0.17	0.0000012349	0.0000018595	1.774	2.793
0.018	0.17	0.0000013327	0.0000021750	1.996	3.030
0.020	0.17	0.0000017265	0.0000038568	2.218	3.908

C.5. Hasil Perhitungan Studi Perpindahan Massa Dan Korelasi Perpindahan Massa Untuk Pelarut DEA (Diethanolamine)

C.5.1. Modul Dengan Jumlah Serat 20

v_{CO_2} (m/s)	Q_L (L/min)	k_L (m/s)	J (mol/(m ² .s))	Re	Sh
0.012	0.17	0.00013	0.00504	1.722	444.175
0.014	0.17	0.00018	0.00891	2.010	594.811
0.016	0.17	0.00018	0.00932	2.297	612.199
0.018	0.17	0.00019	0.00974	2.584	631.794
0.020	0.17	0.00020	0.01056	2.871	673.806

C.5.2. Modul Dengan Jumlah Serat 30

v_{CO_2} (m/s)	Q_L (L/min)	k_L (m/s)	J (mol/(m ² .s))	Re	Sh
0.012	0.17	0.000149	0.00459	1.469	401.757
0.014	0.17	0.000155	0.00477	1.713	413.847
0.016	0.17	0.000161	0.00499	1.958	429.423
0.018	0.17	0.000165	0.00515	2.203	440.784
0.020	0.17	0.000172	0.00536	2.448	458.664

C.5.3. Modul Dengan Jumlah Serat 40

v_{CO_2} (m/s)	Q_L (L/min)	k_L (m/s)	J (mol/(m ² .s))	Re	Sh
0.012	0.17	0.000151	0.00480	1.331	342.698
0.014	0.17	0.000155	0.00495	1.553	354.401
0.016	0.17	0.000158	0.00503	1.774	357.456
0.018	0.17	0.000164	0.00524	1.996	371.913
0.020	0.17	0.000168	0.00538	2.218	379.936

C.6. Hasil Perhitungan Studi Perpindahan Massa Dan Korelasi Perpindahan Massa Untuk Pelarut Campuran MEA (Monoethanolamine) – DEA (Diethanolamine)

C.6.1. Modul Dengan Jumlah Serat 20

v_{CO_2} (m/s)	Q_L (L/min)	k_L (m/s)	J (mol/(m ² .s))	Re	Sh
0.012	0.17	0.000092	0.0128	1.722	325.552
0.014	0.17	0.000105	0.0143	2.010	364.299
0.016	0.17	0.000122	0.0167	2.297	424.052
0.018	0.17	0.000129	0.0179	2.584	450.105
0.020	0.17	0.000142	0.0189	2.871	491.864

C.6.2. Modul Dengan Jumlah Serat 30

v_{CO_2} (m/s)	Q_L (L/min)	k_L (m/s)	J (mol/(m ² .s))	Re	Sh
0.012	0.17	0.0000577	0.00168	1.469	160.140
0.014	0.17	0.0000639	0.00185	1.713	174.493
0.016	0.17	0.0000677	0.00199	1.958	187.259
0.018	0.17	0.0000700	0.00206	2.203	193.282
0.020	0.17	0.0000739	0.00220	2.448	204.030

C.6.3. Modul Dengan Jumlah Serat 40

v_{CO_2} (m/s)	Q_L (L/min)	k_L (m/s)	J (mol/(m ² .s))	Re	Sh
0.012	0.17	0.0000231	0.000109	1.331	54.275
0.014	0.17	0.0000254	0.000129	1.553	59.361
0.016	0.17	0.0000289	0.000159	1.774	67.160
0.018	0.17	0.0000317	0.000183	1.996	73.732
0.020	0.17	0.0000346	0.000211	2.218	80.681

LAMPIRAN D

NILAI VISKOSITAS PELARUT DARI 0°C HINGGA 100°C

LAMPIRAN D
THE VISCOSITY OF WATER 0°C TO 100°C
Contribution from the National Bureau of Standards, not subject to copyright.

°C	η (cp)	°C	η (cp)	°C	η (cp)	°C	η (cp)
0	1.787	26	0.8705	52	0.5290	78	0.3638
1	1.728	27	.8513	53	.5204	79	.3592
2	1.671	28	.8327	54	.5121	80	.3547
3	1.618	29	.8148	55	.5040	81	.3503
4	1.567	30	.7975	56	.4961	82	.3460
5	1.519	31	.7808	57	.4884	83	.3418
6	1.472	32	.7647	58	.4809	84	.3377
7	1.428	33	.7491	59	.4736	85	.3337
8	1.386	34	.7340	60	.4665	86	.3297
9	1.346	35	.7194	61	.4596	87	.3259
10	1.307	36	.7052	62	.4528	88	.3221
11	1.271	37	.6915	63	.4462	89	.3184
12	1.235	38	.6783	64	.4398	90	.3147
13	1.202	39	.6654	65	.4335	91	.3111
14	1.169	40	.6529	66	.4273	92	.3076
15	1.139	41	.6408	67	.4213	93	.3042
16	1.109	42	.6291	68	.4155	94	.3008
17	1.081	43	.6178	69	.4098	95	.2975
18	1.053	44	.6067	70	.4042	96	.2942
19	1.027	45	.5960	71	.3987	97	.2911
20	1.002	46	.5856	72	.3934	98	.2879
21	0.9779	47	.5755	73	.3882	99	.2848
22	.9548	48	.5656	74	.3831	100	.2818
23	.9325	49	.5561	75	.3781		
24	.9111	50	.5468	76	.3732		
25	.8904	51	.5378	77	.3684		

(Sumber : Handbook of Chemistry 62nd edition (F42))