



SKRIPSI - TK141581

**UJI KINERJA KONTAKTOR MEMBRAN MENYILANG
GANDA UNTUK PROSES ABSORPSI-DESORPSI CO₂
SECARA SIMULTAN MENGGUNAKAN PELARUT
DIETANOLAMINA (DEA)**

Disusun Oleh:

**Toto Iswanto
NRP. 2311100026**

**Muhammad Rifa'i
NRP. 2311100187**

Dosen Pembimbing:

**Pembimbing I
Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.
NIP. 1976 1020 2005 01 2001**

**Pembimbing II
Dr. Ir. Susianto, DEA
NIP. 1962 08 20 1989 03 1004**

**LABORATORIUM PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA
JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2015**



SKRIPSI - TK141581

**UJI KINERJA KONTAKTOR MEMBRAN MENYILANG
GANDA UNTUK PROSES ABSORPSI-DESORPSI CO₂
SECARA SIMULTAN MENGGUNAKAN PELARUT
DIETANOLAMINA (DEA)**

Disusun Oleh:

**Toto Iswanto
NRP. 2311100026**

**Muhammad Rifa'i
NRP. 2311100187**

Dosen Pembimbing:

**Pembimbing I
Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.
NIP. 1976 1020 2005 01 2001**

**Pembimbing II
Dr. Ir. Susianto, DEA
NIP. 1962 08 20 1989 03 1004**

**LABORATORIUM PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA
JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2015**



FINAL PROJECT - TK141581

**PERFORMANCE TEST OF DOUBLE CROSSED
MEMBRANE CONTACTOR FOR SIMULTANEOUS
ABSORPTION-DESORPTION OF CO₂ USING
DIETHANOLAMINE (DEA)**

Compiled by:

**Toto Iswanto
NRP. 2311100026**

**Muhammad Rifa'i
NRP. 2311100187**

Advisors:

**Advisor I
Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.
NIP. 1976 1020 2005 01 2001**

**Advisor II
Dr. Ir. Susianto, DEA
NIP. 1962 08 20 1989 03 1004**

**HEAT AND MASS TRANSFER LABORATORY
DEPARTEMENT OF CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2015**

LEMBAR PENGESAHAN

UJI KINERJA KONTAKTOR MEMBRAN MENYILANG GANDA UNTUK PROSES ABSORPSI-DESORPSI CO₂ SECARA SIMULTAN MENGGUNAKAN PELARUT DIETANOLAMINA (DEA)

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kimia
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

Toto Iswanto

NRP. 2311 100 026

Muhammad Rifa'i

NRP. 2311 100 187

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. (Pembimbing 1)
2. Dr. Ir. Susianto, DEA (Pembimbing 2)
3. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S. (Penguji I)
4. Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D. (Penguji II)
5. Dr. Lailatul Qadariyah, S.T., M.T. (Penguji III)



UJI KINERJA KONTAKTOR MEMBRAN MENYILANG GANDA UNTUK PROSES ABSORPSI-DESORPSI CO₂ SECARA SIMULTAN MENGGUNAKAN PELARUT DIETANOLAMINA (DEA)

Nama : 1. Toto Iswanto (2311100026)
: 2. Muhammad Rifa'i (2311100187)
Jurusan : Teknik Kimia ITS
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.
: 2. Dr. Ir. Susianto, DEA

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menguji kinerja kontraktor membran polipropilena serat berongga (*hollow fiber*) dengan inovasi menggabungkan proses absorpsi-desorpsi secara simultan dalam satu modul kontaktor membran menggunakan pelarut dietanolamina (DEA) sehingga diharapkan dapat memisahkan CO₂ secara optimal dengan pemakaian jumlah pelarut yang minimal. Selain itu, penelitian ini bertujuan juga untuk mempelajari pengaruh parameter operasi seperti konsentrasi gas CO₂, laju alir gas CO₂ (gas umpan), dan laju alir N₂ (*sweep gas*) terhadap laju perpindahan massa dan efisiensi absorpsi serta desorpsi CO₂ secara simultan di dalam modul.

Metode pemisahan CO₂ yang akan digunakan dalam penelitian ini terbagi dua, yaitu absorpsi dan desorpsi yang terjadi dalam satu modul membran. Untuk proses absorpsi, variabel yang digunakan adalah laju alir gas umpan (campuran CO₂ dan N₂), sedangkan untuk proses desorpsi, variabel yang digunakan adalah laju alir gas N₂ murni sebagai *sweep gas*. Dalam system kontaktor membran, pelarut DEA didiamkan pada bagian *shell* modul, gas umpan dialirkan ke bagian lumen *tube* pertama, dan *sweep gas* dialirkan ke bagian lumen *tube* kedua. Setelah kondisi tunak tercapai, *sales gas* dan *sweep gas* diambil sebagai sampel yang kemudian diuji menggunakan *Gas Chromatography (GC) analyzer*

untuk mengetahui kandungan CO₂ dalam gas keluar modul membran.

Dari hasil percobaan dapat disimpulkan bahwa fluks absorpsi semakin besar jika konsentrasi gas CO₂ dan laju alir gas umpan semakin besar, sedangkan laju alir *sweep gas* cenderung tidak berpengaruh terhadap besar fluks absorpsi. Fluks absorpsi tertinggi mencapai $2,306 \times 10^{-3}$ mol/m².s. Fluks desorpsi semakin besar jika konsentrasi gas CO₂ semakin besar, laju alir gas umpan semakin kecil, dan laju alir *sweep gas* semakin besar. Fluks desorpsi tertinggi mencapai $4,536 \times 10^{-5}$ mol/m².s. Efisiensi absorpsi semakin besar jika konsentrasi gas CO₂ semakin besar, laju alir gas umpan semakin kecil, dan laju alir *sweep gas* semakin kecil. Efisiensi absorpsi tertinggi mencapai 83,747%. Efisiensi desorpsi turun kemudian naik saat laju alir gas umpan semakin besar, naik kemudian turun saat laju alir *sweep gas* semakin besar, sedangkan konsentrasi gas CO₂ cenderung tidak berpengaruh terhadap besar efisiensi desorpsi. Efisiensi desorpsi tertinggi 4,873%. Secara keseluruhan, kontaktor membran mampu menjalankan fungsi absorpsi dan desorpsi dengan baik selama tiga jam uji kinerja.

Kata Kunci: *absorpsi-desorpsi simultan, membran serat berongga, pemisahan CO₂, polipropilena*

**PERFORMANCE TEST OF DOUBLE CROSSED
MEMBRANE CONTACTOR FOR SIMULTANEOUS
ABSORPTION-DESORPTION OF CO₂ USING
DIETHANOLAMINE (DEA)**

Name : 1. Toto Iswanto (2311100026)
: 2. Muhammad Rifa'i (2311100187)
Department : Chemical Engineering ITS
Advisors : 1. Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.
: 2. Dr. Ir. Susianto, DEA

ABSTRACT

This study aimed to test the performance of polypropylene hollow fiber membrane contactor by combining absorption and desorption process simultaneously in a membrane contactor module using diethanolamine (DEA) as a solvent which was expected to separate CO₂ optimally by using of minimum solvents. In addition, this study also aimed to study the effect of operating parameters such as the concentration and flow rate of CO₂ as a feed gas, and the flow rate of N₂ as a sweep gas against the rate of mass transfer and CO₂ absorption and desorption efficiency simultaneously in the module.

The CO₂ separation method that used in this study was divided into two method, namely the absorption and desorption occurring in a membrane module. For the absorption process, the variable was the flow rate of feed gas (the gas mixture of CO₂ and N₂). Whereas, the variable of desorption process was the flow rate of pure N₂ gas as a sweep gas. In the contactor module system, the solvent was allowed to stand in the shell side of module, where the feed gas was supplied to the lumen of the first tube, and sweep gas flowed into the lumen of the second tube of membrane in module. After steady state was reached, the sales and sweep gas out were tested using Gas Chromatography (GC) analyzer to determine the CO₂ content in the gas sample.

From the experimental results, it could be concluded that the absorption flux was increased if the concentration of CO₂ gas and the flow rate of feed gas were increased, while the flow rate of sweep gas tended not to affect the absorption flux. The highest absorption flux reached $2,306 \times 10^{-3}$ mol/m².s. Desorption flux was increased if the concentration of CO₂ gas was increased, the flow rate of feed gas was decreased, and flow rate of sweep gas was increased. The highest desorption flux reached $4,536 \times 10^{-5}$ mol/m².s. Absorption efficiency was increased if the concentration of CO₂ gas was increased, the flow rate of feed gas was decreased, and flow rate of sweep gas was decreased. The highest absorption efficiency reached 83,747%. Desorption efficiency was decreased then increased when the feed gas flow rate was increased, and then dropped when the flow rate of sweep gas was increased, while the concentration of CO₂ tended not to affect the desorption efficiency. The highest desorption efficiency was 4,873%. Overall, the membrane contactor module was able to role the absorption and desorption process over three hours of performance test.

Keywords: *CO₂ separation, hollow fiber membrane, polypropylene, simultaneous absorption-desorption*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan Laporan Skripsi kami dengan judul:

“UJI KINERJA KONTAKTOR MEMBRAN MENYILANG GANDA UNTUK PROSES ABSORPSI-DESORPSI CO₂ SECARA SIMULTAN MENGGUNAKAN PELARUT DIETANOLAMINA (DEA)”

Skripsi ini merupakan salah satu syarat memperoleh gelar sarjana di Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya. Selama penyusunan skripsi, kami banyak sekali mendapat bimbingan, dorongan, dan bantuan dari banyak pihak. Untuk itu, kami ingin mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M. Eng, selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya.
2. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S., selaku Kepala Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa atas bimbingan dan saran yang telah diberikan
3. Ibu Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Ir. Susianto, DEA selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.
4. Bapak Setiyo Gunawan S.T., Ph.D, selaku Koordinator Tugas Akhir dan Skripsi Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya.
5. Bapak dan Ibu Dosen Pengajar serta seluruh karyawan Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya.
6. Orang tua serta saudara-saudara kami atas do'a, dukungan, bimbingan, perhatian, dan kasih sayang yang selalu tercurah selama ini.
7. Teman-teman di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa dan teman-teman angkatan K-51 atas dukungannya.

Kami menyadari bahwa materi yang kami sajikan masih banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kami sangat mengharapkan saran dan masukan yang konstruktif dari pembaca.

Surabaya, Juli 2015

Penyusun

DAFTAR ISI

LERMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
<i>ABSTRACT</i>	iv
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang Masalah	1
I.2 Rumusan Masalah.....	3
I.3 Batasan Masalah	4
I.4 Tujuan Penelitian	4
I.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 Karbondioksida (CO ₂).....	7
II.2 Kontaktor Membran Serat Berongga.....	8
II.3 Parameter Operasi pada Kontaktor Membran	12
II.4 Pemilihan Mode Aliran	15
II.5 Fenomena Pembasahan.....	16
II.6 Material Membran	18
II.7 Pemilihan Pelarut Alkanolamina	21
II.8 Posisi Penelitian (<i>State of Art</i>).....	23

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Garis Besar Penelitian	27
III.2 Bahan yang Digunakan	27
III.3 Variabel Penelitian	28
III.4 Rangkaian Alat Penelitian	29
III.5 Prosedur Penelitian	30
III.6 Prosedur Analisa Hasil Penelitian	32

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Uji Pengaruh Parameter Operasi	40
IV.2 Uji Kinerja	61

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan	67
V.2 Saran	68

DAFTAR PUSTAKA	xvi
----------------------	-----

DAFTAR NOTASI	xxii
---------------------	------

APPENDIKS	xxiv
-----------------	------

LAMPIRAN	
----------	--

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1	Proses Pemisahan CO ₂ Menggunakan Kontaktor Membran.....	9
Gambar II.2	Perpindahan Massa Komponen i (a) dari fasa gas ke fasa cairan (absorpsi); (b) dari fasa cairan ke fasa uap melalui pori membran (desorpsi).....	10
Gambar II.3	Pola Aliran pada Kontaktor Membran (a) aliran paralel; (b) aliran menyilang.....	16
Gambar II.4	Sudut Kontak dan Pembasahan Permukaan (a) tidak terbasahi, (b) menyebar; (c) menyebar	16
Gambar II.5	Struktur Politetrafluoroetilena (PTFE)	19
Gambar II.6	Struktur Polipropilena (PP).....	20
Gambar II.7	Struktur Polivinildenefluorid (PVDF)	21
Gambar III.1	Modul Kontaktor Membran Tampak Samping	29
Gambar III.2	Penampang Modul Kontaktor Membran Tampak Atas	29
Gambar III.3	Rangkaian Peralatan Penelitian	30
Gambar III.4	Diagram Alir Percobaan Uji Pengaruh Parameter Operasi.....	31
Gambar III.5	Diagram Alir Percobaan Uji Kinerja	32
Gambar III.6	Ilustrasi 3 Dimensi Semua Titik Eksperimen pada Permukaan Bola dengan Metode <i>Central Composite Design</i>	36
Gambar IV.1	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Absorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% dengan Pendekatan Statistik.....	41

Gambar IV.2	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Absorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik.....	41
Gambar IV.3	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Absorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% Hasil Percobaan Eksperimental.....	42
Gambar IV.4	<i>Response Surface</i> Fluks Absorpsi.....	44
Gambar IV.5	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Desorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% dengan Pendekatan Statistik.....	45
Gambar IV.6	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Desorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik.....	45
Gambar IV.7	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Desorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% Hasil Percobaan Eksperimental.....	46
Gambar IV.8	<i>Response Surface</i> Fluks Desorpsi.....	48
Gambar IV.9	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% dengan Pendekatan Statistik.....	49
Gambar IV.10	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik.....	49

Gambar IV.11	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% Hasil Percobaan Eksperimena.....	50
Gambar IV.12	<i>Response Surface</i> Efisiensi Absorpsi.....	51
Gambar IV.13	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Desorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% dengan Pendekatan Statistik.....	52
Gambar IV.14	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Desorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik	53
Gambar IV.15	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Desorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% Hasil Percobaan Eksperimena.....	54
Gambar IV.16	<i>Response Surface</i> Efisiensi Desorpsi.....	55
Gambar IV.17	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO ₂ Loading pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% dengan Pendekatan Statistik.....	56
Gambar IV.18	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO ₂ Loading pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik.....	57
Gambar IV.19	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO ₂ Loading pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% dari Percobaan Eksperimental	57
Gambar IV.20	<i>Response Surface</i> CO ₂ Loading.....	59

Gambar IV.21 Fluks Desorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO₂ 40%61

Gambar IV.22 Fluks Absorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO₂ 40%62

Gambar IV.23 Konsentrasi CO₂ dalam *Sales Gas* Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO₂ 40%63

Gambar IV.24 Efisiensi Absorpsi dan Desorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO₂ 40%64

Gambar IV.25 Hasil SEM Permukaan Membran PP (a) sebelum perendaman; (b) setelah perendaman.....65

Gambar IV.26 Pelarut yang Terbawa oleh Aliran Gas65

DAFTAR TABEL

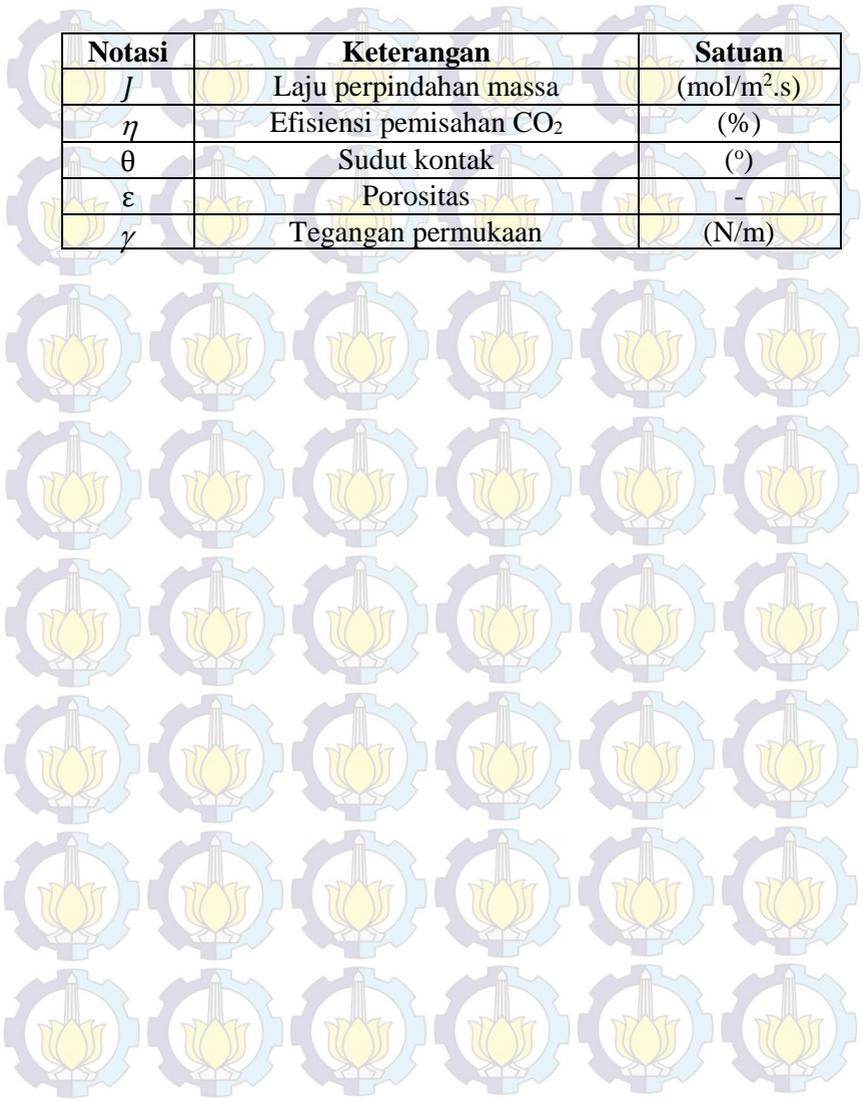
Tabel II.1	Sifat Fisika Karbondioksida (CO ₂)	7
Tabel II.2	Temperatur Transisi Gelas (T _g) Polimer	19
Tabel II.3	Perbandingan Karakteristik Pelarut Alkanolamina	22
Tabel II.4	Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO ₂ Secara Simultan Menggunakan Kontaktor Membran	24
Tabel II.5	Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO ₂ Menggunakan Kontaktor Membran	26
Tabel III.1	Data Karakteristik Membran Polipropilena	28
Tabel III.2	Rentang Nilai Variabel Berubah untuk Percobaan Absorpsi-Desorpsi	28
Tabel III.3	Jumlah Tempuhan Penelitian Setelah Menggunakan DesignExpert®	35



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR NOTASI

Notasi	Keterangan	Satuan
J	Laju perpindahan massa	(mol/m ² .s)
η	Efisiensi pemisahan CO ₂	(%)
θ	Sudut kontak	(°)
ε	Porositas	-
γ	Tegangan permukaan	(N/m)





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN C RIWAYAT HIDUP

Toto Iswanto



Toto Iswanto lahir di Tasikmalaya, Jawa Barat pada tanggal 30 April 1992. Menempuh pendidikan formal di SD Negeri Cibalong 1 Tasikmalaya tahun 1999-2005, kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMP Negeri 1 Cibalong tahun 2005-2008 dan melanjutkan pendidikan SMA di SMA Negeri 1 Karangnunggal tahun 2008-2011. Setelah lulus dari pendidikan SMA, penulis melanjutkan ke tingkat sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Kimia pada tahun 2011 dan terdaftar dengan NRP 2311100026. Di jurusan teknik kimia, penulis mengambil tugas akhir bidang perpindahan panas dan massa dengan spesialisasi teknologi aplikasi membran di bawah bimbingan Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. dan Dr. Ir. Susianto, DEA. Selama masa kuliah, penulis sempat menjadi Asisten Laboratorium Komputasi Numerik Terapan, Mikrobiologi Industri, dan Wawasan Teknologi dan Komunikasi Ilmiah (UPMB). Selain aktif dibidang akademis, penulis pernah menjadi Ketua LSM Himpunan Mahasiswa Bidikmisi ITS tahun 2012-2014 dan *Staff Research and Technology Department* Himatekk tahun 2012-2013. Penulis pernah mendapatkan kesempatan untuk kerja praktek di PT Pertamina RU-III, Plaju-Sungai Gerong, Palembang, Sumatera Selatan tahun 2014 dan menjadi delegasi ITS untuk studi banding ke universitas terbaik di Thailand pada tahun 2013.

Hormat saya,

Toto Iswanto
081232090787

totoiswanto.mt@gmail.com

Muhammad Rifa'i



Muhammad Rifa'i lahir di Metro, Lampung pada tanggal 10 April 1992. Menempuh pendidikan formal di SD Negeri 09 Kunungan-Parik Rantang, Sijunjung, Sumatera Barat tahun 1998-2004, kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMP Negeri 1 Metro tahun 2004-2007 dan melanjutkan pendidikan SMA di SMA Negeri 1 Metro tahun 2007-2010. Setelah lulus dari pendidikan SMA, penulis melanjutkan ke tingkat sarjana di Institut

Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Kimia pada tahun 2011 dan terdaftar dengan NRP 2311100187. Di jurusan teknik kimia, penulis mengambil tugas akhir bidang perpindahan panas dan massa dengan spesialisasi teknologi aplikasi membran di bawah bimbingan Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. dan Dr. Ir. Susianto, DEA. Penulis pernah mendapatkan kesempatan untuk kerja praktek di PT Pertamina RU-III, Plaju-Sungai Gerong, Palembang, Sumatera Selatan tahun 2014.

Hormat saya,

Muhammad Rifa'i

085383009717

muhammad.rifai27@gmail.com

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang Masalah

Indonesia merupakan salah satu negara dengan cadangan gas alam cukup besar. Namun, gas alam tersebut tidak hanya mengandung komponen hidrokarbon, tetapi juga beberapa gas pengotor seperti uap air, N_2 , CO_2 , H_2S , dengan kadar CO_2 dan uap air relatif lebih besar dibandingkan N_2 dan H_2S sehingga diperlukan proses pengolahan gas sebelum dapat dimanfaatkan lebih lanjut.

Pada proses pengolahan gas alam, proses pemisahan karbondioksida (CO_2) menjadi bagian yang sangat penting karena CO_2 di dalam gas alam berperan sebagai pengotor yang bersifat korosif. Jika di dalam gas alam terkandung uap air maka dapat mengasamkan CO_2 menjadi H_2CO_3 . Sifat korosif tersebut sangat merugikan karena menyebabkan penurunan temperatur dan tekanan pada bagian perpipaan, pendingin, dan injektor turbin. Sebagai contoh di dalam turbin gas, CO_2 akan mengakibatkan terjadinya penurunan nilai panas (*heating value*) dan berkurangnya tegangan listrik yang dihasilkan oleh turbin gas tersebut (Tolage, 2009). Dalam proses pengolahan LNG (*Liquefied Natural Gas*), CO_2 harus dihilangkan agar tidak terjadi pembekuan (*icing*) pada saat proses pencairan gas alam (Kartohardjono dkk., 2007) karena proses tersebut berjalan pada suhu yang sangat rendah, yaitu $-161^\circ C$, sedangkan titik beku CO_2 sekitar $-78,4^\circ C$ (Perry & Green, 2008).

Berbagai teknologi telah digunakan dalam proses pemisahan CO_2 dari gas alam, salah satunya dengan kontaktor membran. Kontraktor membran merupakan alternatif pemisahan CO_2 dengan potensi yang menguntungkan dari sisi ekonomi dan efektifitas operasional. Peralatan ini memiliki ukuran 10 kali lebih kecil dari pada *pack tower* (Gabelman & Hwang, 1999), memiliki luas area kontak 4-30 kali lebih besar dibanding luas area kontak kolom konvensional (Simioni dkk., 2011), dan konsumsi energi yang

lebih rendah dibandingkan kolom pemisah konvensional atau hibrid (perpaduan teknologi membran dan kolom pemisah konvensional). Namun, pada umumnya kontaktor membran yang ada sekarang masih menggunakan proses absorpsi-desorpsi CO₂ dengan peralatan terpisah sehingga memerlukan sirkulasi pelarut yang cukup besar, sehingga apabila menggunakan pelarut yang mahal akan meningkatkan total biaya operasional.

Penelitian teknologi kontaktor membran menyilang dengan memanfaatkan proses absorpsi dan desorpsi secara simultan dalam satu modul membran masih jarang ditemukan dalam pustaka jika dibandingkan dengan penelitian yang memanfaatkan proses absorpsi dan desorpsi secara terpisah. Terdapat beberapa penelitian tentang teknologi kontaktor membran untuk proses pemisahan CO₂, hanya saja masih terdapat beberapa kekurangan.

Salah satu penelitian tersebut adalah yang dilakukan oleh Kumazawa (2000) dan Shimada dkk. (2006) yang mengembangkan proses absorpsi-desorpsi CO₂ (5-20% berat) secara simultan dalam satu unit menggunakan kontaktor membran serat berongga polipropilena dengan pelarut *Adenosine Mono Phosphate* (AMP) dan metil aminoetanol (MAE). Percobaan dilakukan dalam satu tangki besar yang berisi banyak pelarut dengan kecepatan pengadukan tertentu untuk homogenitas pelarut, diperoleh hasil bahwa selama 22 hari proses absorpsi-desorpsi dapat berlangsung stabil. Sayangnya, peralatan penelitian tersebut tidak efisien karena selain memerlukan tangki yang besar, diperlukan pula larutan dalam jumlah banyak untuk menggantikan larutan yang telah jenuh oleh gas. Pada tahun 2014, Rahmawati melakukan penelitian mengenai absorpsi dan desorpsi CO₂ (30% berat) secara simultan dalam satu modul membran serat berongga polipropilena menyilang ganda berbentuk balok persegi dengan ukuran yang lebih kecil dari penelitian sebelumnya, yakni 20cm x 10cm x 10cm, dan tekanan operasi dibuat vakum menggunakan pompa vakum. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa efisiensi absorpsi dapat mencapai 46% dan efisiensi desorpsi 45%. Namun, pada penelitian ini terdapat kekurangan, yaitu penggunaan pompa

vakum menyebabkan suhu operasi tidak dapat berjalan konstan karena panas yang ditransfer pompa vakum pada sistem membran kontaktor akibat operasi dalam waktu yang lama.

Pada penelitian-penelitian di atas, variabel yang dipakai masih menggunakan aliran gas CO₂ dengan konsentrasi kecil, yakni 5-30% volume, sedangkan pada kenyataannya kandungan gas CO₂ pada gas alam ada yang mencapai 60% volume. Selain itu, pelarut yang digunakan (AMP, MAE, dan air) termasuk pelarut yang sekarang sudah tidak umum dipakai di industri dan selektivitas penyerapannya terhadap CO₂ pun kurang optimal dibandingkan menggunakan dietanolamina (DEA). Oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai kontaktor membran polipropilena (PP) menyilang ganda untuk proses adsorpsi-desorpsi secara simultan dengan konsentrasi CO₂ yang tinggi menggunakan pelarut dietanolamina (DEA) dan kondisi tekanan operasi atmosferik.

Membran PP akan disusun berlapis dan menyilang, dimana lapisan tersebut digunakan untuk menciptakan konfigurasi proses absorpsi dan desorpsi secara berselang-seling. Kondisi konfigurasi proses tersebut diharapkan bisa memisahkan CO₂ secara optimal dengan pemakaian jumlah pelarut yang minimal.

I.2 Rumusan Masalah

Penelitian mengenai kontaktor membran menggunakan proses absorpsi-desorpsi CO₂ lebih banyak dilakukan secara terpisah/hibrid, dimana pada proses absorpsi-desorpsi dengan peralatan terpisah memerlukan sirkulasi pelarut yang cukup besar sehingga apabila menggunakan pelarut yang mahal akan meningkatkan biaya operasional keseluruhan. Oleh karena itu dikembangkan kontaktor membran untuk proses absorpsi-desorpsi CO₂ secara simultan menggunakan satu modul kontaktor membran menyilang ganda.

Penelitian pada kontaktor membran menyilang untuk proses absorpsi-desorpsi CO₂ secara simultan pernah dilakukan oleh Kumazawa (2000), Shimada dkk. (2006), dan Rahmawati (2014).

Namun, penelitian tersebut masih menggunakan konsentrasi gas CO₂ yang kecil, yakni 5-30% volume, sedangkan kandungan gas CO₂ pada gas alam ada yang mencapai 30-60% volume.

Untuk mengetahui performa kerja dari modul kontaktor membran dengan untuk proses absorpsi-desorpsi secara simultan dalam satu modul membran serat berongga polipropilena menggunakan pelarut dietanolamina (DEA) dengan konsentrasi CO₂ sebagai gas umpan yang tinggi, maka dilakukan uji kinerja modul tersebut dengan terlebih dahulu mempelajari pengaruh parameter operasi seperti konsentrasi CO₂, laju alir gas CO₂ (gas umpan), dan laju alir gas N₂ (*sweep gas*) terhadap laju perpindahan massa dan efisiensi pemisahan CO₂ sehingga diketahui parameter operasi yang optimal untuk digunakan sebagai parameter operasi uji kinerja modul kontaktor membran secara kontinyu selama 8 jam.

I.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Membran kontaktor di dalam modul membran yang disusun menyilang ganda terbuat dari membran polipropilena (PP).
2. Pelarut yang digunakan untuk proses absorpsi CO₂ adalah dietanolamina (DEA) yang dioperasikan secara diam/*batch*, sedangkan untuk proses desorpsi CO₂ menggunakan N₂ sebagai *sweep gas*.
3. Laju alir dan konsentrasi gas CO₂ masuk diatur sesuai variabel penelitian.

I.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini yaitu untuk:

1. Mempelajari pengaruh parameter operasi seperti konsentrasi CO₂, laju alir gas CO₂ (gas umpan), dan laju alir gas N₂ (*sweep gas*) terhadap laju perpindahan massa dan efisiensi pemisahan CO₂ dalam modul kontaktor membran menyilang ganda dengan konsentrasi gas CO₂ yang tinggi.

2. Melakukan uji kinerja modul kontaktor membran secara kontinyu selama 8 jam untuk mengetahui besar fluks absorpsi dan desorpsi CO₂ serta efisiensi pemisahannya.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat diantaranya:

1. Memberikan inovasi baru berupa konfigurasi susunan membran, yaitu konfigurasi menyilang ganda, dimana membran polipropilena untuk proses absorpsi dan desorpsi masing-masing disusun secara menyilang dan berlapis (berganda). Konfigurasi seperti ini mampu mempercepat regenerasi pelarut (DEA) yang digunakan untuk mengabsorpsi CO₂ dari gas alam karena CO₂ yang baru terabsorpsi dari membran aliran gas umpan oleh pelarut dapat langsung didesorpsi oleh *sweep gas* ke dalam membran aliran *sweep gas* sehingga kontaktor membran tersebut mampu memisahkan CO₂ secara optimal dengan pemakaian jumlah pelarut yang minimal.
2. Penelitian tentang uji kontaktor membran yang disusun secara menyilang ganda menggunakan pelarut DEA dengan meninjau parameter operasinya belum pernah ada. Dengan demikian, penelitian ini dapat memberikan data-data parameter operasi pada beberapa kondisi laju alir gas umpan dan *sweep gas* masuk serta konsentrasi gas umpan dalam modul kontaktor membran polipropilena menyilang ganda secara simultan sehingga dapat dijadikan referensi atau rujukan dalam pengaplikasian kontaktor membran menyilang ganda skala industri.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Karbondioksida (CO₂)

Karbon dioksida (CO₂) adalah gas tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak mudah terbakar. Karbondioksida juga senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon. Karbondioksida tidak berbentuk cair pada tekanan di bawah 5,1 atm, namun langsung menjadi padat pada temperatur di bawah -78°C.

Tabel II.1 Sifat Fisika Karbondioksida (CO₂)

Sifat	Nilai
Titik didih	-57,5°C
Titik beku normal	-78,4°C
Temperatur kritis	38°C
Tekanan kritis	0,6 kg/cm ² .g
Panas peleburan	1.900 cal/mol
Panas penguapan	6.030 cal/mol

(Sumber: Perry & Green, 2008)

Karbondioksida merupakan gas yang bersifat asam dan jika bereaksi dengan air dapat membentuk senyawa yang bersifat asam kuat, yaitu asam karbonat (H₂CO₃) yang dapat menyebabkan korosi pada sistem perpipaan dan peralatan proses. Dalam proses pencairan gas alam menjadi LNG, terdapat kontaminan berupa gas-gas pengotor yang harus dihilangkan agar tidak terjadi pembekuan pada temperatur yang sangat rendah. Hal ini karena proses pencairan gas alam berjalan pada suhu -161°C yang akan menyebabkan CO₂ membeku (-78,4°C) dan mengganggu proses tersebut (Kartohardjono dkk., 2007). Permasalahan pada gas alam yang paling utama adalah adanya kandungan CO₂ dan H₂S yang cukup besar, yaitu dengan kandungan CO₂ sebesar 21,576% mol dari keseluruhan komposisi gas alam.

II.2 Kontaktor Membran Serat Berongga

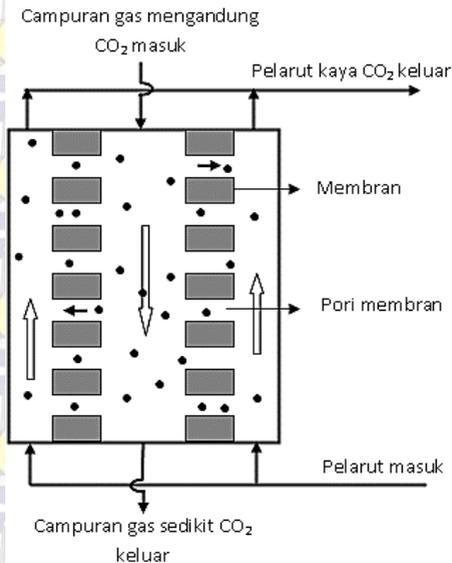
Berbagai teknologi telah digunakan dalam proses pemisahan CO₂ dari gas alam seperti absorpsi, adsorpsi, kriogenik, dan teknologi membran. Untuk adsorpsi, penyerapan CO₂ belum begitu efisien dan regenerasi pelarut yang sulit. Kriogenik membutuhkan instalasi dan operasi yang besar. Untuk absorpsi, pada kolom konvensional terdapat banyak kelemahan yaitu terjadinya *entrainment*, *flooding*, *loading*, dan *foaming*, membutuhkan energi yang besar, serta instalasinya besar (Cooney, 1989). Sedangkan untuk teknologi membran, penurunan tekanan yang terjadi besar dan selektivitasnya buruk sehingga menyebabkan terdapat hidrokarbon yang lolos bersama dengan CO₂. Oleh karena itu digunakan teknologi kontaktor membran yang diharapkan dapat menganggulangi masalah di atas.

Membran *hollow fiber* dapat diartikan sebagai membran kapiler yang terdiri dari bagian *tube* dan *shell*, persis seperti *heat exchanger*. Absorben mengalir di dalam *tube* sedangkan aliran gas mengalir di bagian *shell* atau bisa juga sebaliknya. Kelebihan teknologi ini dibanding teknologi absorpsi gas-cairan konvensional adalah terpisahnya aliran gas dan cairan sehingga pengaturan pola aliran dapat bersifat fleksibel untuk menghindari kemungkinan *flooding*, *loading*, dan *entrainment* yang umum terjadi pada teknologi konvensional (Gabelman dan Hwang, 1999). Luas permukaan kontak gas-cairan untuk kolom unggun tetap (*packed column*) mendekati 30-300 m²/m³ sedangkan kontaktor membran bisa mencapai 1.600-6.600 m²/m³ (Mulder, 1996).

Kontaktor membran dapat mengakomodasi perpindahan massa gas-cair tanpa adanya dispersi satu fasa ke fasa lainnya. Perpindahan antar fasa pada kontraktor membran didorong oleh adanya beda konsentrasi komponen antara fasa dan penurunan tekanan yang diperlukan untuk menahan interfasa antarfluida sangat kecil.

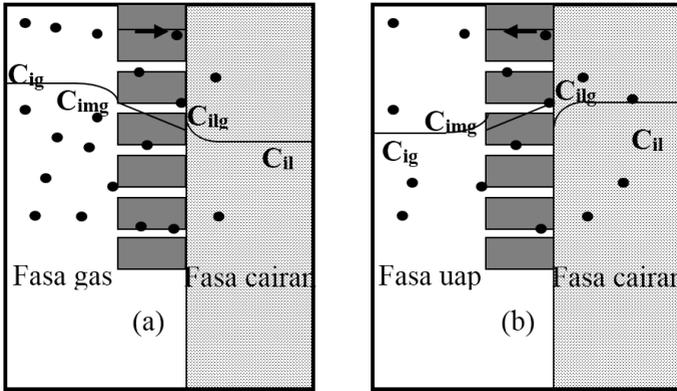
Teknologi kontaktor membran untuk pemisahan CO₂ merupakan pengembangan membran poros hidrofobik sebagai media pembatas yang membantu kontak dua fluida untuk tujuan

perpindahan massa tanpa terjadi dispersi dari satu fasa ke fasa lainnya. Kelebihan teknologi ini dibanding teknologi absorpsi konvensional adalah luas permukaan per volume tinggi sehingga kemungkinan untuk terjadinya perpindahan massa lebih besar (Rahmawati, 2014). Proses pemisahan CO₂ menggunakan kontaktor membran disajikan pada **Gambar II.1**.



Gambar II.1 Proses Pemisahan CO₂ Menggunakan Kontaktor Membran

Proses perpindahan massa suatu komponen dari fasa gas ke dalam fasa cairan melewati pori membran terdiri dari tiga tahap, yaitu perpindahan komponen terlarut dalam fasa badan gas ke permukaan membran, perpindahan gas melewati pori membran ke permukaan cairan, dan perpindahan gas dari permukaan cairan ke fasa badan cairan (Mansourizadeh, 2011). Peristiwa perpindahan massa ini berlaku sebaliknya untuk proses desorpsi seperti disajikan pada **Gambar II.2**.



Gambar II.2 Perpindahan Massa Komponen i (a) dari fasa gas ke fasa cairan (absorpsi); (b) dari fasa cairan ke fasa uap melalui pori membran (desorpsi).

Gambar di atas menjelaskan fluks pada keadaan tunak dari komponen i melalui lapisan gas sama dengan fluks melalui membran, dan sama dengan fluks melalui lapisan cairan yang didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut.

$$J_i = k_{ig} (C_{ig} - C_{img}) = k_{im} (C_{img} - C_{ilg}) = k_{il} (C_{ilg} - C_{il}) \quad (\text{II.1})$$

dimana:

k_{ig} = koefisien perpindahan massa dalam fasa gas komponen i (dm/s)

k_{im} = koefisien perpindahan massa dalam membrankomponen i (dm/s)

k_{il} = koefisien perpindahan massa dalam fasa cairan komponen i (dm/s)

C_{ig} = konsentrasi komponen i dalam fasa gas (mol/L)

C_{img} = konsentrasi komponen i pada antarfasa gas-membran (mol/L)

C_{ilg} = konsentrasi komponen i pada antarfasa gas-cairan (mol/L)

C_{il} = konsentrasi komponen i dalam fasa cairan (mol/L)

Untuk proses desorpsi, perpindahan massa komponen i terjadi dari fasa cairan ke fasa uap dapat menggunakan persamaan yang sama dengan merubah tanda dalam masing-masing fluks.

Koefisien perpindahan massa keseluruhan tergantung pada koefisien perpindahan massa individu, yaitu di bagian fasa gas ($1/k_{ig}$), membran ($1/k_{im}$), dan fasa cairan ($1/k_{il}$) dengan persamaan teoritis hambatan seri sebagai berikut (Kreulen dkk., 1993b).

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{k_{il}E} + \frac{1}{k_{im}H} + \frac{1}{k_{ig}H} \quad (\text{II.2})$$

Ketika menggunakan membran *hollow fiber* dengan cairan di bagian *shell* dan gas mengalir di sisi lumen, dengan daerah antarfasa gas-cairan berada pada diameter luar lumen (*nonwetted mode*), maka persamaan (II.2) adalah sebagai berikut:

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{k_{il}E} + \frac{d_o}{k_{im}Hd_{im}} + \frac{d_o}{k_{ig}Hd_i} \quad (\text{II.3})$$

H adalah konstanta hukum Henry tak berdimensi yang merupakan perbandingan konsentrasi gas pada keadaan setimbang terhadap konsentrasi pelarut (Qi & Cussler, 1985), E adalah faktor hambatan yang merupakan perbandingan dari fluks absorpsi dengan adanya reaksi kimia terhadap fluks absorpsi dengan tidak ada reaksi kimia (Khaisri dkk., 2010), d_i , d_o , dan d_{im} adalah berturut-turut diameter dalam, diameter luar dari *fiber*, dan diameter rata-rata di bagian membran ($d_o \cdot d_i / \ln(d_o/d_i)$). Persamaan koefisien perpindahan massa di atas menggunakan asumsi ukuran pori dan karakteristik pembasahan membran seragam.

Pada proses absorpsi, hambatan perpindahan massa untuk difusi gas dari badan gas ke permukaan luar membran dapat diabaikan dibanding hambatan lainnya (Karror dkk., 1993, Rangwala, 1996, Dindore dkk., 2004). Dalam kasus absorpsi gas secara fisik sebagai contoh absorpsi CO_2 menggunakan air, hambatan perpindahan massa dihubungkan dengan fasa cairan yang bergantung pada hidrodinamika percobaan dan memerlukan laju alir cairan tetap (Mansourizadeh & Ismail, 2009).

II.3 Parameter Operasi pada Kontaktor Membran

Dalam pengoperasian kontaktor membran untuk pemisahan CO_2 , ada beberapa variabel operasi yang dapat mempengaruhi proses pemisahan antara lain:

1. Laju alir cairan

Hasil Kim & Yang (2000) menunjukkan bahwa peningkatan koefisien perpindahan massa pada kontaktor membran berbanding lurus dengan laju alir pelarut karena beda konsentrasi pada sisi gas dan cairan semakin tinggi sehingga jumlah CO_2 yang diserap semakin besar. Kosaraju dkk. (2005) mendapatkan hasil sedikit berbeda, yaitu peningkatan laju alir cairan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap koefisien perpindahan massa. Nii dkk. (1995) menyatakan bahwa pada konsentrasi NaOH yang tinggi (1 M), laju alir cairan tidak memberikan pengaruh terhadap koefisien perpindahan massa keseluruhan, sedangkan pada konsentrasi NaOH yang rendah, peningkatan laju alir cairan akan meningkatkan koefisien perpindahan massa. Selain itu, pada laju reaksi yang tinggi, konsentrasi CO_2 di bagian cairan keluar lebih tinggi jika laju alir cairan lebih rendah, sehingga konsentrasi CO_2 akan menurun dengan meningkatnya laju alir pelarut (Kim & Yang, 2000).

2. Konsentrasi pelarut

Kim & Yang (2000), Kumar dkk. (2002) melakukan penelitian bahwa pemisahan CO_2 semakin meningkat

dengan meningkatnya konsentrasi pelarut dan dengan jangka waktu tertentu, pelarut menjadi jenuh sehingga kemampuan menyerap CO₂ berkurang. Kinerja pemisahan ditunjukkan sebagai persen pemisahan CO₂, dimana persen pemisahan CO₂ akan optimal (mendekati 100%) pada konsentrasi pelarut tertentu.

3. Laju alir gas

Penelitian Wang dkk. (2006) menunjukkan bahwa laju alir gas berpengaruh terhadap laju absorpsi CO₂. Laju alir gas yang tinggi menyebabkan jumlah CO₂ yang diabsorpsi semakin meningkat.

4. Tekanan parsial CO₂

Kinerja perpindahan massa ditunjukkan sebagai fluks CO₂ melalui fiber membran. Feron dan Jansen (1995) melaporkan bahwa pada temperatur ruang, fluks merupakan fungsi rata-rata logaritmik tekanan parsial CO₂. Pada tekanan parsial CO₂ yang rendah, fluks CO₂ meningkat hampir linear dengan meningkatnya tekanan parsial CO₂. Sedangkan Kumar dkk. (2002) memperoleh hasil yang sedikit berbeda dimana tekanan parsial CO₂ mempunyai pengaruh linear terhadap fluks CO₂.

5. Tekanan campuran gas

Tekanan gas bisa dimanfaatkan untuk mengatasi permasalahan pembasahan pori membran oleh cairan. Penurunan fluks dan koefisien perpindahan massa terjadi karena adanya hambatan perpindahan massa fiber meningkat akibat pembasahan membran. Jika tekanan gas ditingkatkan, maka cairan yg memasuki pori fiber membran akan didorong balik ke dalam lumen membran (Wang dkk., 2006). Hedayat dkk. (2011) melaporkan bahwa setelah operasi absorpsi selama 14 hari, efisiensi absorpsi dapat meningkat kembali dengan menaikkan tekanan gas. Namun, kenaikan tekanan gas dibatasi oleh tekanan kritis gelembung (*bubbling*) (ΔP_b). Jika tekanan gas dinaikkan melebihi ΔP_b , maka akan terjadi gelembung di sisi cairan.

6. Tekanan operasi

Dindore dkk. (2004) melakukan percobaan pemisahan CO₂ menggunakan kontaktor membran hingga tekanan 20 bar, diperoleh hasil bahwa fluks akan meningkat dengan meningkatnya tekanan operasi. Namun, tekanan operasi tidak berpengaruh terhadap koefisien perpindahan massa total tetapi hanya menurunkan koefisien perpindahan massa pada fiber membran. Pada absorpsi fisik, hambatan perpindahan massa sisi cairan memiliki pengaruh yang paling dominan sehingga hambatan perpindahan massa fiber membran dapat diabaikan dan tidak mempengaruhi koefisien perpindahan massa total. Sedangkan untuk kasus dengan reaksi kimia, hambatan perpindahan massa fiber membran tidak bisa diabaikan karena hambatan sisi cairan lebih rendah dengan adanya faktor hambatan (*enhancement factor*).

7. Temperatur

Temperatur absorpsi memberikan pengaruh terhadap kinerja perpindahan massa. Pada temperatur yang tinggi, laju reaksi dan laju difusi lebih tinggi sehingga dapat meningkatkan koefisien perpindahan massa (Feron dkk., 2002). Khaisri dkk. (2011) melaporkan bahwa laju perpindahan massa pada proses desorpsi CO₂ dari pelarut MEA mengalami peningkatan seiring dengan naiknya temperatur. Untuk absorpsi menggunakan pelarut air, pengaruh temperatur justru berlaku sebaliknya, karena dengan kenaikan temperatur menyebabkan uap air mengisi pori membran sehingga difusi gas ke dalam cairan menjadi menurun dan hambatan perpindahan massa fiber membran meningkat (Wang dkk., 2000).

8. Penempatan Fluida

Modul kontaktor membran *hollow fiber* menyerupai alat perpindahan panas yang terdiri atas *shell* dan *tube*, dimana yang berfungsi sebagai *tube* adalah membran *hollow fiber* itu sendiri. Fluida dialirkan di bagian lumen dan bagian

shell dari membran. Untuk kontaktor membran gas-cairan, cairan lebih baik mengalir di dalam lumen dan gas mengalir di sisi *shell* (deMontigny dkk., 2006).

II.4 Pemilihan Mode Aliran

Modul kontaktor membran *hollow fiber* bisa dioperasikan dalam dua mode aliran, yaitu mode aliran paralel dan mode aliran menyilang. Dalam penelitian ini akan digunakan mode aliran menyilang dengan alasan pemilihan mode aliran yang dipakai sebagai berikut.

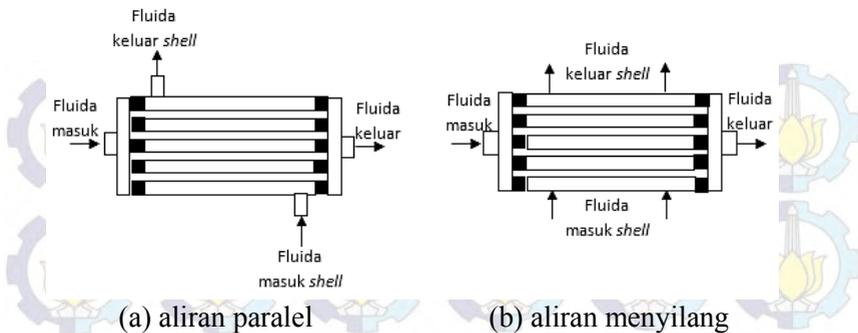
1. Mode aliran paralel

Pada aliran paralel kedua fasa fluida mengalir sejajar dengan *fiber* yang terbagi menjadi aliran searah (*co-current*) atau aliran berlawanan (*counter-current*). Pada aliran berlawanan, gaya dorong yang lebih besar sehingga lebih dipilih pada kondisi dimana tahanan perpindahan massa sisi membran dikontrol (Wang & Cussler, 1993). Selain itu, variasi tekanan transmembran (TMP) relatif tinggi sehingga menyebabkan terjadinya perpindahan dari satu fasa ke fasa lainnya. Pada aliran paralel, koefisien perpindahan massa total dapat menurun jika hambatan perpindahan massa sisi *shell* besar.

2. Mode aliran menyilang (*cross flow module*)

Aliran menyilang adalah aliran fluida di bagian *shell* tegak lurus dengan fiber. Aliran ini lebih atraktif karena dapat merusak lapisan pembatas (*boundary layer*) akibat pemisahan dan pencampuran kontinyu fluida yang mengalir tegak lurus sehingga koefisien perpindahan massa sisi *shell* lebih besar (Gabelman & Hwang, 1999).

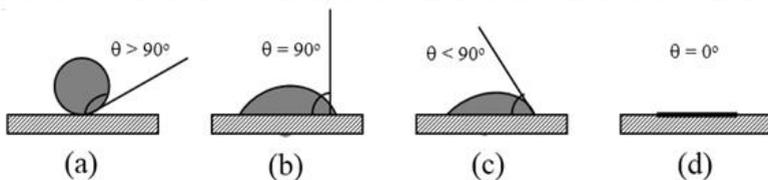
Untuk pola aliran fluida paralel dan menyilang pada kontaktor membran disajikan dalam Gambar II.3.



(a) aliran paralel (b) aliran menyilang
Gambar II.3 Pola Aliran pada Kontaktor Membran

II.5 Fenomena Pembasahan

Fenomena pembasahan terjadi karena adanya pelarut mengisi pori membran. Kecenderungan pembasahan fiber membran disebabkan oleh ukuran pori membran, tegangan permukaan pelarut, dan sudut kontak yang merupakan interaksi antara pelarut dan membran. Ketika tetesan cairan berkontak dengan permukaan fiber membran, bentuk akhir tetesan pada permukaan bergantung pada gaya molekular cairan (kohesi) dan antara cairan dan permukaan (adhesi). Pembasahan fiber membran dapat diprediksi dari sudut kontak yang dibuat oleh tetesan cairan dan permukaan fiber membran seperti disajikan dalam **Gambar II.4**.



Gambar II.4 Sudut Kontak dan Pembasahan Permukaan
 (a) tidak terbasahi; (b) menyebar; (c) menyebar; (d) terbasahi

Permukaan membran terbasahi sempurna ketika sudut kontak adalah nol. Sedangkan pada sudut kontak antara 0° hingga 90° menghasilkan penyebaran tetesan cairan karena adanya gaya molekular di permukaan dan membasahi pori membran. Untuk sudut kontak lebih besar dari 90° , cairan cenderung untuk menjauh dari permukaan membran sehingga tidak membasahi permukaan.

Pori membran hidrofobik yang memiliki energi permukaan rendah seperti politetrafluoroetilena (PTFE) dan polipropilena (PP) akan lebih sulit ditembus pelarut sampai tekanan minimum cairan masuk pori membran (*breakthrough pressure*). Tekanan minimum cairan ini merupakan korelasi antara tegangan permukaan pelarut, sudut kontak pelarut, fiber membran, serta ukuran pori membran. Hubungan ini ditunjukkan dengan persamaan Laplace-Young sebagai berikut:

$$\Delta P = -\frac{2\gamma_L \cos \theta}{r_{maks}} \quad (II.4)$$

dengan ΔP adalah tekanan minimum cairan masuk pori membran (kPa), γ_L adalah tegangan permukaan pelarut, θ adalah sudut kontak antara pelarut dan membran, dan r_{maks} adalah ukuran pori membran maksimum.

Dari persamaan (II.4) dapat disimpulkan bahwa tekanan minimum cairan dapat meningkat dengan (1) menggunakan fiber membran yang memiliki ukuran pori lebih kecil; (2) meningkatkan sudut kontak antara pelarut dan membran, dan (3) meningkatkan tegangan permukaan pelarut. Kumar dkk. (2002) melakukan penelitian mengenai pengukuran tekanan minimum cairan untuk sejumlah pelarut alkanolamina dengan membran PTFE dan diperoleh hasil bahwa morfologi permukaan fiber membran dapat berubah dengan adanya pelarut. Meniskus air ke dalam pori membran menyebabkan pembesaran pori membran sehingga tekanan minimum lebih rendah dibanding prediksi menggunakan persamaan di atas.

II.6 Material Membran

Penelitian ini menggunakan membran polipropilena (PP) karena jika dibandingkan dengan fiber lainnya (PE, PTFE, dan PVDF), membran PP menunjukkan aplikasi yang komprehensif karena tersedia dalam berbagai ukuran, porositas yang terkendali dengan baik, stabilitas termal dan kimia yang tinggi, dan biaya yang rendah jika dibandingkan dengan jenis membran yang lain (Rahmawati, 2014).

Dalam pemilihan material membran, ada beberapa kriteria dari material yang harus diperhatikan, yaitu:

- Stabilitas kimia

Stabilitas kimia dari material membran, memberikan efek terhadap stabilitas jangka panjangnya. Setiap reaksi yang terjadi antara solven dengan material fiber membran dapat mempengaruhi integritas dan struktur permukaan membran. Agar stabilitas kimia terjamin, bahan pelarut yang digunakan harus kompatibel dengan material membran.

- Stabilitas termal

Pada temperatur tinggi, material membran dapat mengalami dekomposisi atau degradasi. Kecenderungan perubahan membran tergantung pada temperatur transisi gelas (T_g) polimer untuk polimer amorf atau temperatur leleh (T_m) untuk polimer kristalin. Jika melewati temperatur tersebut, sifat polimer akan berubah secara drastis. Temperatur transisi gelas polimer ditentukan oleh struktur kimia seperti fleksibilitas dan interaksi ikatan rantai. Polimer yang mempunyai T_g lebih tinggi cenderung lebih stabil. Dalam **Tabel II.2** ditunjukkan bahwa PTFE memiliki T_g lebih tinggi dibandingkan PET dan PP sehingga sifatnya lebih stabil.

Tabel II.2 Temperatur Transisi Gelas (T_g) Polimer

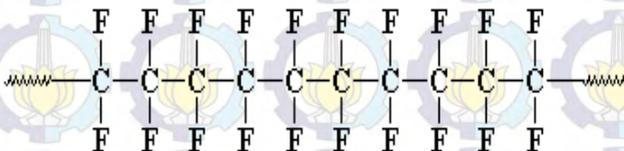
Polimer	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
Politetrafluoroetilena (PTFE)	126
Polipropilena (PP)	-15
Polietilena (PE)	-120
Polieter sulfon (PES)	230
Polisulfon (PS)	190
Polivinildenefluorid (PVDF)	-40
Polidimetilsiloksana (PDMS)	-123

(Sumber: Mulder, 1996)

Material membran yang umum digunakan pada pemisahan CO_2 dengan kontaktor membran adalah PP dan PTFE. Disamping itu juga para peneliti telah mencoba beberapa jenis material lain, antara lain PDMS, PE, PES, PVDF, dan membran keramik.

- Politetrafluoroetilena (PTFE)

PTFE tersusun dari rantai karbon dimana setiap atom karbon mengikat dua atom fluorin.

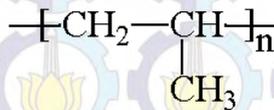


Gambar II.5 Struktur Politetrafluoroetilena (PTFE)

Membran PTFE merupakan membran yang hidrofobik dan paling stabil jika digunakan untuk pemisahan CO_2 dengan membran kontaktor. Studi yang dilakukan oleh Matsumoto dkk. (1995) memperoleh hasil bahwa hanya membran PTFE yang tidak mengalami pembasahan setelah dioperasikan selang waktu tertentu. Nishikawa dkk. (1995)

melaporkan bahwa kinerja membran PTFE stabil bahkan setelah dioperasikan selama 6.600 jam. Penelitian selanjutnya yang dilakukan oleh Falk-Pedersen (2001) juga mendapatkan hasil bahwa PTFE adalah material membran terbaik dengan koefisien perpindahan massa total volumetrik lebih besar.

- Polipropilena (PP)
Polipropilena juga bersifat hidrofobik, tetapi memiliki T_g yang rendah, sehingga kurang stabil dibanding PTFE dan rentan terhadap pembasahan. Kelebihannya yaitu harganya jauh lebih murah dibanding PTFE.



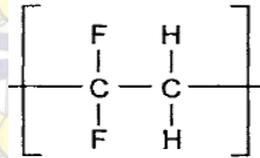
Gambar II.6 Struktur Polipropilena (PP)

Beberapa penelitian melaporkan bahwa PP cenderung mengalami pembasahan parsial. Misalnya percobaan yang dilakukan Wang dkk. (2006) yang memperoleh hasil bahwa pada beberapa jam pertama fluks CO_2 cenderung menurun sampai akhirnya bernilai konstan. Hal ini menunjukkan bahwa membran mengalami pembasahan pada awal percobaan dan kemudian stabil.

- Polidimetilsiloksana (PDMS)
Percobaan dengan menggunakan membran PDMS dilakukan oleh Nii dkk. (1995), mereka menggabungkan proses permeasi dan absorpsi gas dimana proses penggabungannya disebut *permabsorption*. Dari hasil percobaan diperoleh hasil persen pemisahan CO_2 yang memuaskan.

- Polivinilidenefluorid (PVDF)

PVDF memiliki hambatan kimia dan termal yang sangat bagus dan stabil pada kebanyakan senyawa kimia dan organik yang bersifat korosif, seperti asam, alkalin, oksidan, dan halogen. PVDF memiliki kinerja yang stabil terbukti dengan nilai fluksnya yang konstan setelah dioperasikan selama rentang waktu tertentu. (Atcharyawut dkk., 2006).



Gambar II.7 Struktur Polivinildenefluorid (PVDF)

- Polietilena (PE)

Membran mikropori polietilena memiliki kinerja yang jelek terbukti dengan terjadinya pembasahan saat digunakan pada kontaktor membran. Nishikawa dkk. (1995) melakukan perlakuan permukaan dengan material fluorokarbonik untuk meningkatkan hidrofobisitas membran. Namun, membran PE yang telah dimodifikasi tersebut memiliki kecenderungan untuk terdegradasi sehingga kinerjanya makin lama makin menurun.

II.7 Pemilihan Pelarut Alkanolamina

Pada proses absorpsi CO₂ dari gas alam, biasanya digunakan pelarut kimia golongan alkanolamina, yaitu monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA), dan metildietanolamina (MDEA), yang dipilih berdasarkan kecepatan laju absorpsi, kemampuan penyerapan CO₂ yang tinggi dan kemudahan regenerasi. Perbandingan Karakteristik Pelarut Alkanolamina dapat dilihat pada tabel **Tabel II.3** di bawah ini.

Tabel II.3 Perbandingan Karakteristik Pelarut Alkanolamina

Pelarut	Kelebihan	Kekurangan
<i>Monoethanole Amine</i> (MEA)	<ul style="list-style-type: none">• Mampu menghilangkan CO₂• <i>Recovery</i> CO₂ tinggi.• Harganya paling murah dibanding pelarut amin lainnya.	<ul style="list-style-type: none">• Paling korosif diantara DEA dan MDEA.• Kurang reaktif terhadap CO₂ dibandingkan DEA dan MDEA.• Tekanan uapnya tinggi sehingga banyak massa yang hilang saat diregenerasi.
<i>Diethanole Amine</i> (DEA)	<ul style="list-style-type: none">• Harganya tidak terlalu mahal.• Paling efektif menyerap CO₂ dibandingkan DEA dan MDEA.	<ul style="list-style-type: none">• Bersifat korosif
<i>Methyl Diethanole Amine</i> (MDEA)	<ul style="list-style-type: none">• Tidak korosif.• Banyak digunakan untuk absorpsi dengan kandungan CO₂ yang tinggi.• Energi untuk regenerasi rendah.	<ul style="list-style-type: none">• Akibat keselectifannya yang tinggi terhadap H₂S, maka akan terjadi CO₂ <i>slippage</i> sehingga absorpsi CO₂ kurang maksimal.• Harganya paling mahal di antara pelarut amin lainnya.

(Sumber: Kohl & Nielsen, 1997 ; Kidnay, 2006)

Pada penelitian ini akan digunakan dietanolamina (DEA) karena sifat korosi yang lebih rendah dan laju absorpsi cukup dibandingkan MEA yang memiliki laju absorpsi CO₂ dan korosif paling tinggi, serta MDEA yang merupakan basa paling lemah dibanding MEA dan DEA (Wang dkk., 2004).

II.8 Posisi Penelitian (*State of Art*)

Dari penjelasan di atas, diperoleh suatu kesimpulan bahwa penelitian ini merupakan lanjutan dari penelitian-penelitian sebelumnya. Penelitian mengenai absorpsi-desorpsi CO₂ secara simultan menggunakan kontaktor membran serat berongga dengan pelarut bukanlah penelitian yang pertama, namun penelitian ini masih belum begitu banyak. Penelitian terdahulu lebih banyak membahas proses absorpsi dan desorpsi CO₂ secara terpisah melalui kontaktor membran. Posisi penelitian ini lebih jelasnya dapat digambarkan melalui tabel *State of the Art* berikut.

Tabel II.4 Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO₂ Secara Simultan Menggunakan Kontaktor Membran

Material/ Proses	Penelitian	Hasil	Referensi
PP/ simultan dalam sartu modul	Memodelkan dan mengukur permeabilitas dan faktor pemisahan melalui membran cair untuk sistem CO ₂ -N ₂ melalui berbagai tekanan parsial CO ₂ . Mereka menggunakan pendekatan <i>immobilized liquid membrane</i> dan	Hasilnya model ini tidak membutuhkan energi eks-ternal dan diperoleh nilai faktor pemisahan CO ₂ /N ₂ adalah dari 230-516.	Guha dkk. (1990)

Tabel II.4 Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO₂ Secara Simultan Menggunakan Kontaktor Membran (lanjutan)

Material/ Proses	Penelitian	Hasil	Referensi
PP/ simultan dalam sartu modul	larutan dietanolamina. Dalam sistem ini, DEA diamobilisasi dalam pori-pori membran PP mikro hidrofobik, dan gas He sebagai <i>sweep gas</i> .		
PTFE/ simultan dalam satu modul	Proses absorpsi-desorpsi secara simultan dalam satu unit kontaktor membran dengan pelarut AMP dan metil aminoetanol (MAE). Percobaan dilakukan dalam satu tangki yang berisi absorben dengan pengadukan untuk homo-genitas pelarut.	Selama 22 hari proses absorpsi-desorpsi berlangsung stabil. Selain itu, laju absorpsi dikontrol oleh reaksi kimia dan difusi CO ₂ dalam pori-pori terisi cairan pada reaksi regim lambat, sedangkan laju desorpsi dikontrol oleh reaksi kimia dan difusi di bagian pori terisi cairan dan lapisan stagnan pada reaksi regim tengah	Kumazawa (2000) dan Shimada dkk. (2006)

Tabel II.4 Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO₂ Secara Simultan Menggunakan Kontaktor Membran (lanjutan)

Material/ Proses	Penelitian	Hasil	Referensi
PP/ simultan dalam satu modul	Meneliti mengenai absorpsi dan desorpsi CO ₂ secara simultan dalam satu modul membran serat berongga polipropilena menyilang ganda pada tekanan vakum menggunakan pelarut air.	Hasil perhitungan perpindahan massa untuk variasi laju alir pelarut diperoleh oleh kesesuaian dengan hasil pengukuran perpindahan massa menggunakan kontaktor membran menyilang dengan efisiensi absorpsi dan desorpsi serta laju perpindahan massa memberikan hasil lebih tinggi dibanding proses absorpsi dan desorpsi terpisah. Efisiensi absorpsi mencapai 46% dan efisiensi desorpsi 45%.	Rahmawati (2014)

Tabel II.5 Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO₂ Menggunakan Kontaktor Membran

Proses	Membran	Pelarut	Dimensi Modul	Gas masuk	Q_1 (ml/min)	Desorpsi	Pemisahan (%)	Fluks (mol/m ² .s)	Pustaka
Simultan dalam satu modul	PTFE	MAE: 0,5-2 M	Absorpsi: L: 30 cm A: 75,4 cm ² Desorpsi: L: 30 cm A: 754 cm ²	CO ₂ : 5-20%	Batch	Aliran N ₂ T: 30°C P: 1 atm	-	Laju absorpsi 10,9-12,9 > laju desorpsi	Shinada dkk. (2006)
Simultan dalam satu modul	PTFE	AMP: 0,5-2 M	Absorpsi: L: 30 cm A: 137 cm ² Desorpsi: L: 30 cm A: 1.370 cm ²	CO ₂ : 5-20%	Batch	Aliran N ₂ T: 30°C P: 1 atm	-	Absorpsi-desorpsi: 10 ⁻³ – 10 ⁻⁷	Kumazawa (2000)
Hibrid	PP	CORAL: 2 M	L: 5 cm A: 2,7.103 cm ²	CO ₂ : 0,05-10%	8-300	T: 105°C	-	Absorpsi: 0,22 mol/m ² .s	Feron dkk. (2002)
Hibrid	PP	MEA & MDEA: 0,5-3 M	L: 80 cm A: 6,05.10 ⁴ cm ²	-	0,025-0,1 m/s	-	Absorpsi: 90	Absorpsi: 8,89.10 ⁴ mol/m ² .s	Yan dkk. (2007)
Simultan beda modul	PVDF	Air	L: 15 cm A: 240 cm ²	CO ₂ murni	50-200	Aliran N ₂ T: 26-60°C	Desorpsi: < 30	Absorpsi: 8,5.10 ⁻⁴ Desorpsi: 3,0.10 ⁻⁸	Mansourizadeh dkk. (2011)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Garis Besar Penelitian

Secara garis besar uji kontaktor membran menyilang ganda dilakukan secara eksperimen di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, Teknik Kimia ITS. Dalam penelitian ini dilakukan proses absorpsi-desorpsi CO₂ secara simultan dalam modul membran dengan larutan DEA 30% berat sebagai pelarut. Pada proses absorpsi, gas CO₂ (gas umpan) mengalir di salah satu lumen dan larut ke dalam pelarut DEA yang diam (*batch*). Pada proses desorpsi, gas N₂ (*sweep gas*) mengalir di bagian lumen lain yang tegak lurus dengan aliran gas CO₂ dan meregenerasi pelarut dengan cara mengambil CO₂ yang ada dalam pelarut. Variabel yang digunakan adalah konsentrasi gas umpan, laju alir gas umpan, dan laju alir *sweep gas*. Konsentrasi CO₂ dalam gas keluar kontaktor membran dianalisa menggunakan *Gas Chromatography (GC) analyzer*, sedangkan morfologi membran dianalisa menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)*.

III.2 Bahan yang Digunakan

1. Membran *hollow fiber* polipropilena (spesifikasi karakteristik membran disajikan dalam **Tabel III.1**).
2. Gas umpan dengan konsentrasi CO₂ 40% dan 99,9%, *balance* N₂ (PT Aneka Gas Industri).
3. Gas N₂ dengan konsentrasi 99,95%, *balance* O₂ (PT Aneka Gas Industri).
4. Pelarut dietanolamina (DEA) 30% berat (PT Pertamina RU-VI Balongan).

Tabel III.1 Data Karakteristik Membran Polipropilena

Parameter	Keterangan
Diameter dalam (d_i) (mm)	0,35
Diameter luar (d_o) (mm)	0,5
Diameter pori (d_p) (μm)	0,2
Panjang fiber (mm)	83
Jumlah fiber	2.500
Jumlah lapisan	25
Luas kontak gas-cairan (m^2)	21,195
Porositas	0,65

III.3 Variabel Penelitian

III.3.1 Variabel Tetap

1. Konsentrasi pelarut DEA (30% berat).

III.3.2 Variabel Berubah

1. Konsentrasi CO_2 dalam gas umpan.
2. Laju alir gas umpan.
3. Laju alir gas N_2 (*sweep gas*).

Rentang nilai variabel yang digunakan ada pada **Tabel III.2**.

Tabel III.2 Rentang Nilai Variabel Berubah untuk Percobaan
Absorpsi-Desorpsi

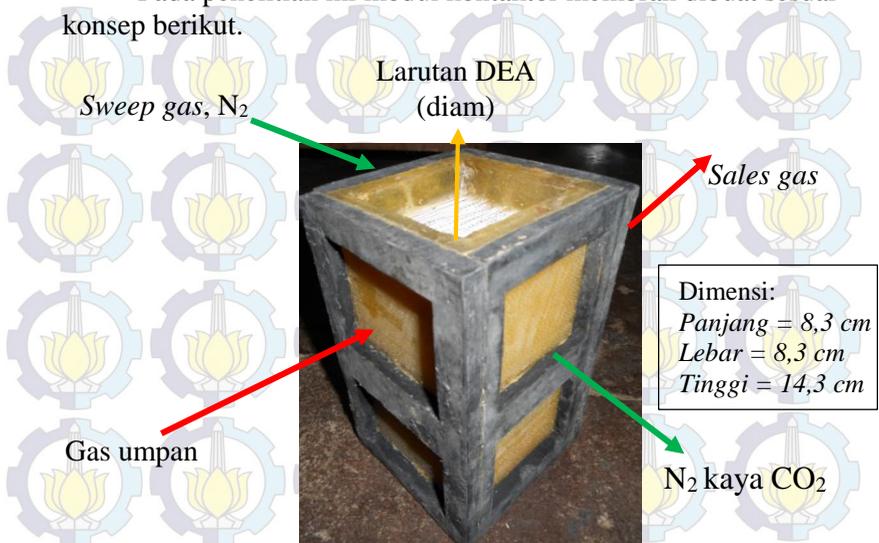
No.	Variabel	Nilai
1.	Konsentrasi CO_2 gas umpan (% volume)	40 dan 99,9 400 - 800
2.	Laju alir gas umpan (ml/menit)	400, 600, dan
3.	Laju alir gas N_2 (ml/menit)	800

III.3.3 Variabel Respon

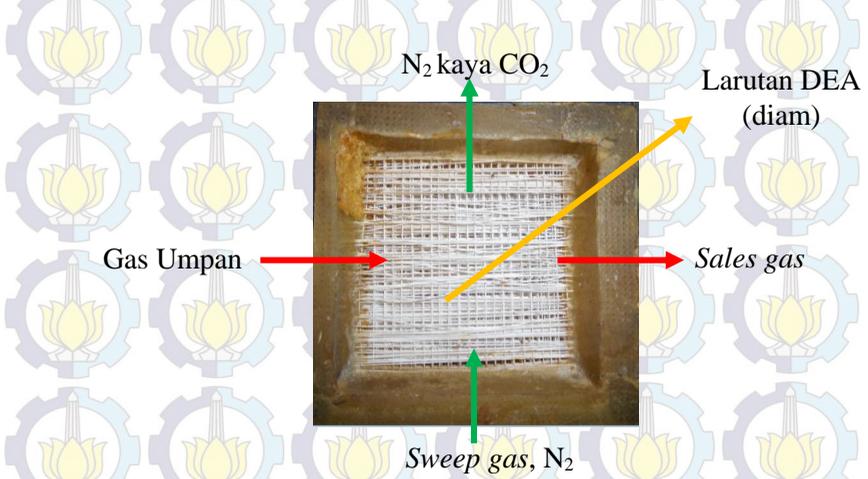
1. Laju perpindahan massa (fluks) absorpsi CO_2 .
2. Laju perpindahan massa (fluks) desorpsi CO_2 .
3. Efisiensi absorpsi CO_2 .
4. Efisiensi desorpsi CO_2 .
5. CO_2 loading pelarut.

III.4 Rangkaian Alat Penelitian

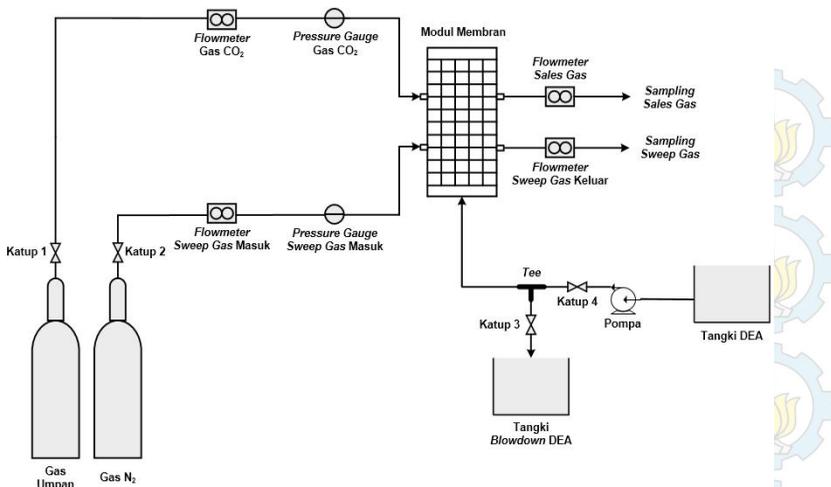
Pada penelitian ini modul kontaktor membran dibuat sesuai konsep berikut.



Gambar III.1 Modul Kontaktor Membran Tampak Samping



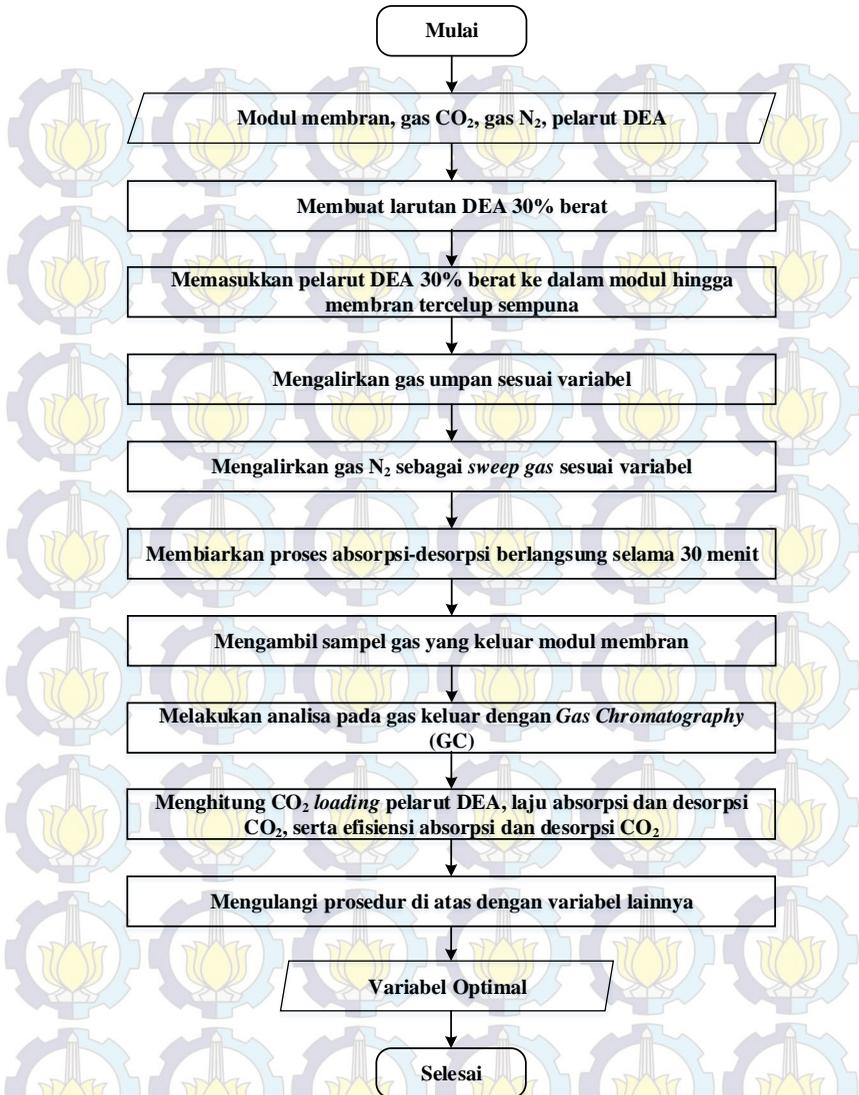
Gambar III.2 Penampang Modul Kontaktor Membran Tampak Atas



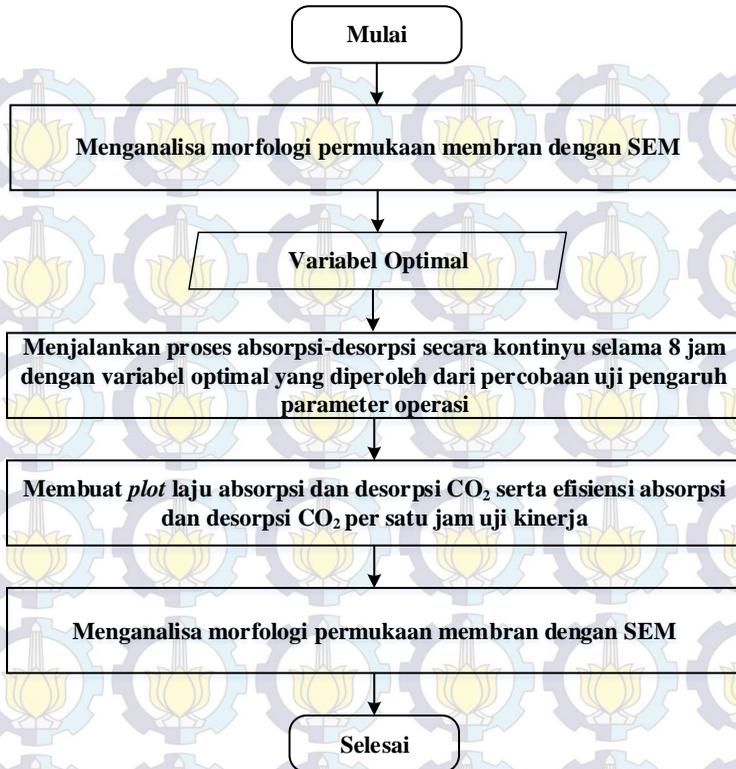
Gambar III.3 Rangkaian Peralatan Penelitian

III.5 Prosedur Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menguji kinerja modul kontaktor membran menyilang ganda untuk proses absorpsi-desorpsi secara simultan. Modul membran yang berbahan dasar polipropilena disusun secara menyilang dan berlapis secara bergantian. Gas umpam dan gas N₂ mengalir di bagian lumen membran secara menyilang dan simultan. Pada proses absorpsi, gas CO₂ mengalir secara kontinyu dengan laju alir gas bervariasi melewati lumen dengan pembacaan laju alir gas menggunakan *flowmeter*, sedangkan pelarut diam di bagian *shell*. Pada proses desorpsi, CO₂ yang terlarut dalam pelarut DEA di bagian *shell* berdifusi melewati pori membran yang dibantu dengan *sweep gas* (N₂ murni) untuk membantu proses regenerasi pelarut. Konsentrasi gas CO₂ dan *sweep gas* keluar modul dianalisa menggunakan *Gas Chromathography (GC) analyzer*. Secara skematik, prosedur penelitian ini disajikan pada **Gambar III.4** dan **Gambar III.5**.



Gambar III.4 Diagram Alir Percobaan Uji Pengaruh Parameter Operasi



Gambar III.5 Diagram Alir Percobaan Uji Kinerja

III.6 Prosedur Analisa Hasil Penelitian

Analisa hasil pada percobaan ini berupa analisa gas CO₂ menggunakan *Gas Chromatography (GC) analyzer* dan analisa morfologi membran. Sampel gas yang keluar modul dianalisa menggunakan *GC analyzer* untuk mengetahui kandungan CO₂-nya sehingga dapat ditentukan laju perpindahan massa CO₂. Analisa morfologi membran dilakukan untuk mengetahui kinerja membran yang berkaitan dengan pembasahan permukaan membran.

III.6.1 Analisa Konsentrasi Gas CO₂ Keluar Modul Membran & CO₂ Loading

Konsentrasi gas CO₂ keluar modul membran dianalisa dengan metode *Gas Chromatography* (GC). GC analyzer menggunakan kolom PorapakQ yang dapat mendeteksi gas-gas seperti CO₂, O₂, CO, dan N₂. Injeksi gas ke dalam alat menggunakan *syringe* khusus gas. *Carrier gas* yang dipakai oleh GC analyzer ini adalah gas helium (He). Dari analisa ini dapat diketahui konsentrasi dari gas CO₂, yang nantinya digunakan untuk menghitung fluks absorpsi (J_{CO_2}) dan efisiensi absorpsi (η) dengan menggunakan persamaan yang digunakan oleh (Lv dkk., 2011):

$$J_{CO_2} = \frac{(Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}) \times 273,15}{0,0224 \times T_g \times S} \quad (III.1)$$

$$\eta = \frac{Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}}{Q_{in} \times C_{in}} \times 100\% \quad (III.2)$$

di mana Q_{in} dan Q_{out} adalah laju alir gas umpan dan laju alir *sales gas* (m³/jam), η adalah efisiensi absorpsi (%), C_{in} dan C_{out} adalah konsentrasi CO₂ dalam gas umpan dan *sales gas* (%), T_g adalah temperatur gas (K), dan S adalah luas kontak gas-cair pada permukaan membran (m²).

Sedangkan untuk proses desorpsi menggunakan persamaan berikut.

$$J'_{CO_2} = \frac{(V_{out} \times K_{out}) \times 273,15}{0,0224 \times T_g \times S} \quad (III.3)$$

$$\eta' = \frac{V_{out} \times K_{out}}{Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}} \times 100\% \quad (III.4)$$

di mana J'_{CO_2} adalah fluks desorpsi ($\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$), η' adalah efisiensi desorpsi (%), V_{out} adalah laju alir gas N_2 (*sweep gas*) keluar (m^3/jam), Q_{in} dan Q_{out} adalah laju alir gas umpan dan laju alir *sales gas* (m^3/jam), K_{out} adalah konsentrasi CO_2 dalam *sweep gas* keluar (%), C_{in} dan C_{out} adalah konsentrasi CO_2 dalam gas umpan dan *sales gas* (%), T_g adalah temperatur gas (K), dan S adalah luas kontak gas-cair pada permukaan membran (m^2).

CO_2 loading pelarut didefinisikan sebagai jumlah mol CO_2 yang diserap per mol pelarut, yang dirumuskan dengan:

$$CO_2 \text{ loading} = \frac{Q_{in} \times C_{in} - (Q_{out} \times C_{out} + V_{out} \times K_{out})}{n_{DEA}} \times 0,001 \quad (\text{III.5})$$

di mana Q_{in} dan Q_{out} adalah laju alir gas umpan dan laju alir *sales gas* (m^3/jam), C_{in} dan C_{out} adalah konsentrasi CO_2 dalam gas umpan dan *sales gas* (%), V_{out} adalah laju alir gas N_2 (*sweep gas*) keluar (m^3/jam), K_{out} adalah konsentrasi CO_2 dalam *sweep gas* keluar (%), dan n_{DEA} adalah jumlah mol pelarut DEA 30% berat.

III.6.2 Analisa Kinerja Membran

Kinerja membran dianalisa dengan meninjau parameter laju perpindahan massa dan efisiensi pemisahan CO_2 dalam kontaktor membran yang dioperasikan secara kontinyu selama 8 jam menggunakan parameter operasi optimum yang telah ditetapkan sebelumnya. Selain itu, bentuk permukaan membran sebelum dan sesudah perendaman dengan pelarut DEA juga dianalisa untuk mengetahui pengaruh fenomena pembasahan terhadap permukaan membran. Semakin lama perendaman (semakin lama membran dioperasikan) maka semakin besar efek pembasahan pada permukaan membran (Dindore dkk., 2004). Pembasahan akan menurunkan performa membran

dalam proses absorpsi-desorpsi. Permukaan membran dianalisa dengan SEM (*Scanning Electron Microscope*).

III.6.3 Pengolahan Data Hasil Penelitian dengan DesignExpert® 9

Proses pengolahan data dalam penelitian ini dibantu dengan perangkat lunak statistik DesignExpert® 9. Jumlah tempuhan yang harus dilakukan menurut variabel yang digunakan adalah 50 tempuhan. Namun, dengan menggunakan perangkat lunak ini, jumlah tempuhan dapat dikurangi hingga 19 tempuhan.

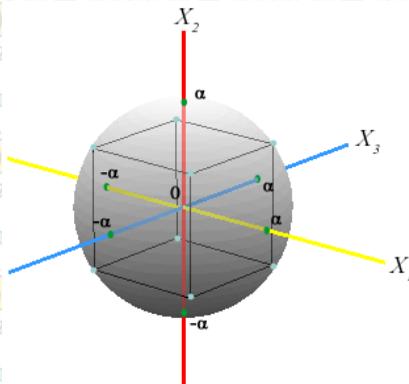
Tabel III.3 Jumlah Tempuhan Penelitian Setelah Menggunakan DesignExpert® 9

Tempuhan	Konsentrasi CO ₂ (% volume)	Laju Alir Sweep Gas Masuk (ml/min)	Laju Alir Gas Umpan (ml/min)
1*	40	400	400
2 [#]	40	400	800
3*	40	600	600
4 [#]	40	800	400
5*	40	800	800
6 [#]	69,95	400	600
7 [#]	69,95	600	400
8 ⁺	69,95	600	600
9 ⁺	69,95	600	600
10 ⁺	69,95	600	600
11 ⁺	69,95	600	600

Tabel III.3 Jumlah Tempuhan Penelitian Setelah Menggunakan DesignExpert® 9 (lanjutan)

Tempuhan	Konsentrasi CO ₂ (% volume)	Laju Alir Sweep Gas Masuk (ml/min)	Laju Alir Gas Umpan (ml/min)
12 ⁺	69,95	600	600
13 [#]	69,95	600	800
14 [#]	69,95	800	600
15 [*]	99,9	400	400
16 [#]	99,9	400	800
17 [*]	99,9	600	600
18 [#]	99,9	800	400
19 [*]	99,9	800	800

Untuk mendapatkan 19 dari 50 tempuhan tersebut digunakan metode *central composite design* yang secara ringkas dapat digambarkan sebagai berikut.



(sumber: <http://onlinecourses.science.psu.edu>)

Gambar III.6 Ilustrasi 3 Dimensi Semua Titik Eksperimen pada Permukaan Bola dengan Metode *Central Composite Design*

Gambar III.6 merepresentasikan pengolahan data berdasarkan desain komposit pusat/*Central Composite Design* (CCD) dengan menggunakan nilai $k=3$, dimana k menunjukkan dimensi permodelan dari pengolahan data eksperimen. Nilai $k=3$ dipilih karena dapat menghasilkan wilayah prediksi hasil eksperimen tiga dimensi berbentuk bola dengan dimensi kotak didalamnya sehingga akan diperoleh prediksi wilayah hasil eksperimen yang optimal.

Dalam pengolahan data menggunakan CCD, terdapat alternatif pilihan di mana $\alpha = (n_F)^{1/4}$ (akar keempat jumlah titik di bagian faktorial dari desain) memberikan model desain yang dapat diputar, seperti yang terlihat di **Gambar III.6**. Pada model ini, jika terdapat k faktor, maka terdapat pula 2^k poin faktorial, $2*k$ poin aksial, dan poin pusat n_c yang jumlah semua poin tersebut menyatakan jumlah variabel yang harus diteliti secara eksperimen. Data yang diperoleh kemudian diolah untuk mendapatkan nilai hasil permodelan untuk variabel yang lain.

Sebagaimana telah ditentukan, nilai k pada pengolahan data penelitian ini adalah 3 ($k=3$), maka akan diperoleh nilai-nilai sebagai berikut.

2^k poin faktorial	: 8
$2*k$ poin aksial	: 6
<u>Poin pusat n_c (varian)</u>	<u>: 5 +</u>
Total	: 19

Dari perhitungan di atas dapat diketahui bahwa terdapat 19 tempuhan yang harus diteliti secara eksperimen yang terdiri dari 8 tempuhan sebagai poin faktorial, 6 tempuhan sebagai poin aksial, dan 5 tempuhan sebagai poin pusat n_c , dimana untuk masing-masing tempuhan poin faktorial, poin aksial, dan poin pusat n_c dapat dilihat pada **Tabel III.3** yang secara berturut-turut yang ditandai dengan *, #, dan +.

Dari 19 tempuhan tersebut, terdapat 5 variabel yang sama. Variabel-variabel yang sama tersebut harus tetap dilakukan secara eksperimen karena 5 variabel tersebut sangat terkait dengan varian dari nilai prediksi. Alasan lain adalah karena 5 variabel tersebut bertindak sebagai variabel koreksi sehingga nilai prediksi nantinya dapat mewakili nilai-nilai di seluruh wilayah, terutama di dekat pusat karena diharapkan bahwa nilai optimal adalah di wilayah tengah. Maka, dengan memilih 5-6 poin pusat, akan membuat data nilai prediksi lebih presisi (kira-kira sama) antara data varian di tengah dengan data varians di tepi.

Dari 19 tempuhan di atas, perangkat lunak ini dapat memprediksi tren hubungan variabel respon terhadap variabel berubah. Hubungan antara variabel respon dengan variabel berubah diwujudkan dengan persamaan regresi yang juga dilengkapi dengan informasi koefisien korelasi (R^2) untuk mengetahui seberapa kuat hubungan persamaan regresi dengan ke 19 titik percobaan yang merupakan variabel berubah. Persamaan regresi ini nantinya dapat digunakan untuk membuat grafik sehingga dapat dilihat kecenderungan variabel respon terhadap variabel berubah awal.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mempelajari pengaruh parameter operasi seperti konsentrasi CO₂, laju alir gas CO₂ (gas umpan), dan laju alir gas N₂ (*sweep gas*) terhadap laju perpindahan massa dan efisiensi pemisahan CO₂ dalam modul kontaktor membran menyilang ganda dengan konsentrasi gas CO₂ yang tinggi. Parameter operasi yang optimal kemudian digunakan sebagai variabel untuk menguji kinerja kontaktor membran secara kontinyu selama 8 jam untuk mengetahui besar fluks absorpsi dan desorpsi CO₂ serta efisiensi pemisahannya. Respon yang diukur untuk kedua tujuan tersebut adalah laju perpindahan massa (fluks) absorpsi dan desorpsi CO₂ serta efisiensi absorpsi dan desorpsi CO₂. Prinsip dasar dari perpindahan massa CO₂ baik absorpsi maupun desorpsi dalam penelitian ini adalah akibat adanya perbedaan konsentrasi sehingga mendorong difusi gas CO₂ dari konsentrasi yang tinggi ke konsentrasi yang rendah.

Dalam penelitian ini, konfigurasi membran yang digunakan adalah menyilang dengan proses absorpsi dan desorpsi terjadi secara simultan dalam satu modul membran. Konfigurasi seperti ini masih jarang ditemui di penelitian-penelitian sebelumnya. Penelitian yang dilakukan oleh Mansourizadeh (2011) antara absorpsi dan desorpsi terjadi secara simultan, namun pada dua modul membran berbeda. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Shimada dkk. (2006), proses absorpsi dan desorpsi terjadi simultan dalam satu modul, tetapi konfigurasinya acak (tidak disusun secara menyilang).

Penelitian ini menggunakan variabel berubah konsentrasi CO₂ dalam gas umpan sebesar 40% dan 99,9%. Variabel respon untuk konsentrasi CO₂ 40% dihasilkan dari percobaan dan pendekatan statistik Design Expert® 9, sedangkan variabel respon untuk konsentrasi CO₂ 99,9% didekati dengan hasil perhitungan statistik Design Expert® 9. Variabel yang diperhitungkan untuk mendapatkan variabel respon menggunakan pendekatan model

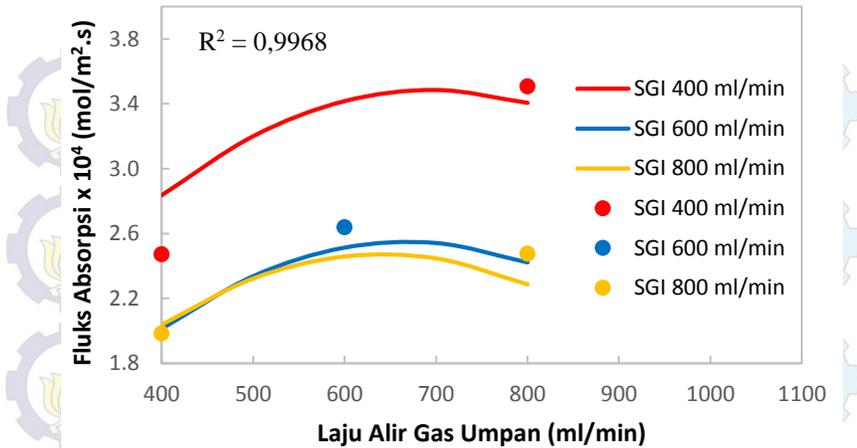
statistik adalah konsentrasi gas CO₂, laju alir gas umpan, dan laju alir *sweep gas* masuk.

IV.1 Uji Pengaruh Parameter Operasi

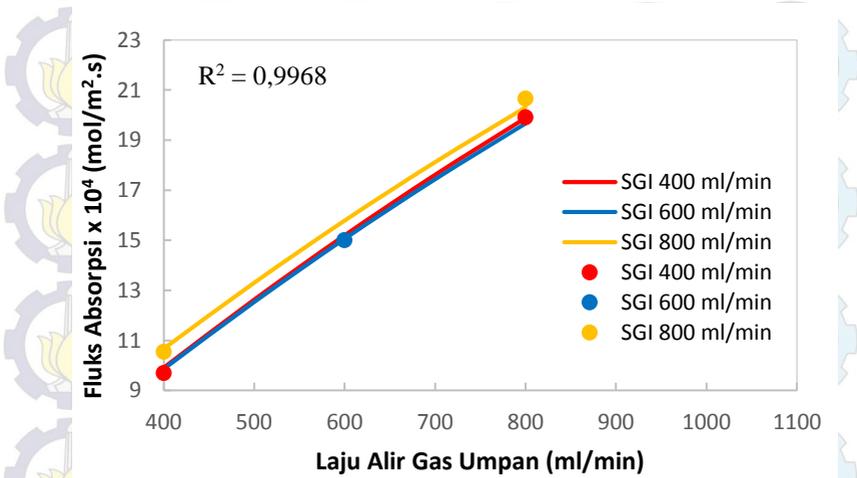
Tujuan pertama pada penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh parameter operasi seperti konsentrasi CO₂, laju alir gas CO₂ (gas umpan), dan laju alir N₂ (*sweep gas*) terhadap laju perpindahan massa dan efisiensi pemisahan CO₂ dalam modul kontakor membran.

Variabel yang digunakan untuk tujuan pertama ini adalah gas campuran (gas umpan) dengan konsentrasi 40% CO₂ + 60% N₂ dan 99,9% CO₂ + 0,1% N₂, serta laju alir gas umpan masuk sebesar 400-800 ml/menit dan laju alir *sweep gas* masuk sebesar 400, 600, dan 800 ml/menit. Tekanan yang digunakan adalah 1 atm pada suhu ambien (suhu ruangan).

Percobaan pertama dilakukan pada konsentrasi gas CO₂ 40% dengan laju alir sebesar 400-800 ml/menit. Untuk melakukan proses absorpsi gas CO₂, modul membran diisi dengan pelarut dietanolamina (DEA) 30% berat hingga semua fiber membran di dalam modul terendam sempurna. Gas N₂ digunakan sebagai gas penyapu (*sweep gas*) yang akan menyerap gas CO₂ (desorpsi) yang terdapat dalam pelarut DEA sehingga terjadi regenerasi DEA. Laju alir *sweep gas* masuk adalah 400, 600, dan 800 ml/menit. Proses absorpsi CO₂ oleh DEA dan desorpsi oleh gas N₂ terjadi dalam satu modul secara simultan. Setelah 30 menit proses berjalan, *sales gas* (gas umpan yang keluar modul membran) dan *sweep gas* yang keluar modul membran dianalisa menggunakan *gas chromatography analyzer*. Kemudian dilanjutkan dengan percobaan kedua menggunakan gas CO₂ 99,9% dengan variabel yang sama dengan percobaan pertama.



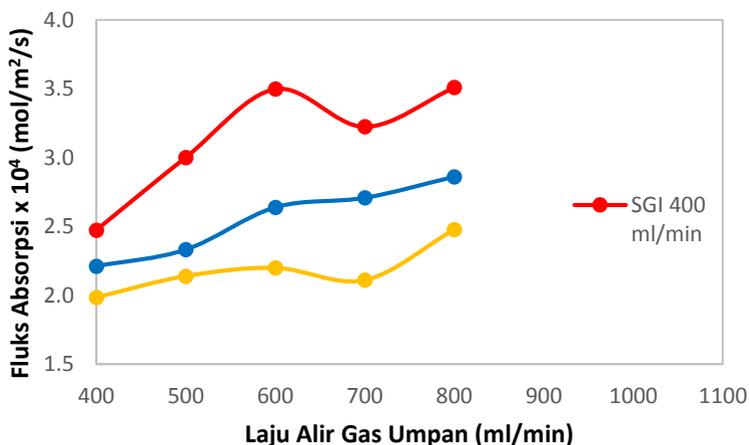
Gambar IV.1 Pengaruh Laju Alir Gas Umpam terhadap Fluks Absorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% dengan Pendekatan Statistik



Gambar IV.2 Pengaruh Laju Alir Gas Umpam terhadap Fluks Absorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik

Sebagai hasil dari sebuah persamaan regresi, maka setiap grafik akan dilengkapi dengan koefisien korelasi (R^2) yang menunjukkan seberapa eratny hubungan antara variabel berubah dengan varibel respon yang dihasilkan. Koefisien korelasi yang dihasilkan di sini adalah koefisien korelasi *overall* untuk satu variabel respon, mengingat persamaan regresinya juga untuk satu variabel respon. Misal variabel respon di sini adalah fluks absorpsi, maka persamaan regresi dan koefisien korelasinya akan sama, baik untuk konsentrasi CO_2 40% dan 99,9%, maupun untuk berbagai laju alir *sweep gas*. Hal ini juga berlaku untuk variabel respon lainnya (fluks desorpsi, efisiensi absorpsi, efisiensi desorpsi, dan CO_2 loading). Persamaan regresi untuk setiap variabel respon terlampir di halaman appendixs.

Titik-titik pada grafik di **Gambar IV.1** dan **Gambar IV.2** adalah titik percobaan yang dilakukan secara eksperimental. Titik-titik percobaan tersebut sudah dapat mewakili hasil keseluruhan. Hal ini terbukti dengan nilai koefisien korelasi yang mendekati 1.



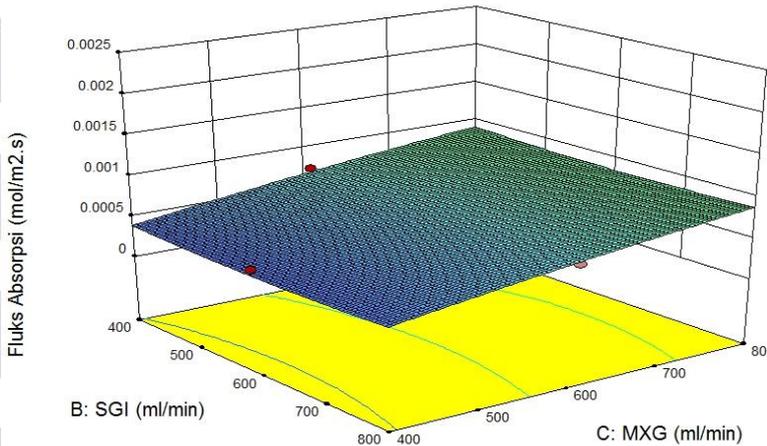
Gambar IV.3 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Absorpsi CO_2 pada Berbagai Laju Alir *Sweep Gas In* (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO_2 40% Hasil Percobaan Eksperimental

Seperti yang terlihat pada **Gambar IV.1** dan **Gambar IV.2**, semakin besar konsentrasi gas CO₂, semakin besar fluks absorpsi. Konsentrasi CO₂ yang semakin besar akan membuat perbedaan konsentrasi semakin besar sehingga CO₂ dapat dengan cepat berdifusi ke dalam pelarut DEA.

Untuk laju alir *sweep gas* yang sama, semakin besar laju alir gas umpan, semakin besar fluks absorpsinya. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Lv dkk. (2011), laju alir gas yang semakin besar menyebabkan peningkatan laju perpindahan massa CO₂ pada aliran gas CO₂ di dalam membran dan akan mengurangi ketebalan lapisan batas gas yang menyebabkan jumlah gas CO₂ yang terdistribusi 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 besar. Untuk konsentrasi gas CO₂ 40%, tren yang dihasilkan oleh percobaan dan oleh pendekatan statistik sedikit berbeda. Hasil percobaan menunjukkan fluks absorpsi semakin naik jika laju alir gas umpan semakin besar, sedangkan hasil pendekatan statistik menunjukkan fluks absorpsi naik kemudian sedikit turun pada laju alir gas umpan 800 ml/min.

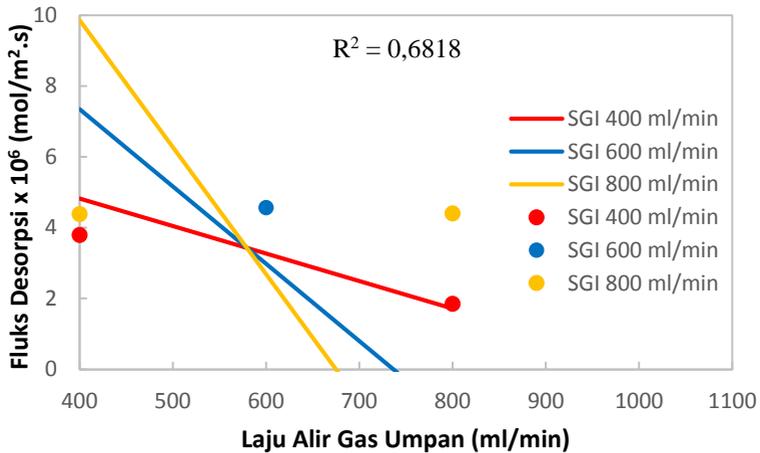
Untuk laju alir gas umpan yang sama, fluks absorpsi pada kedua konsentrasi menunjukkan hasil yang cukup berbeda. Untuk konsentrasi gas CO₂ 40%, baik secara percobaan maupun dengan pendekatan statistik, semakin besar laju alir *sweep gas*, semakin kecil fluks absorpsi. Hal ini dapat disebabkan karena laju alir *sweep gas* yang semakin besar akan mengurangi waktu tinggal *sweep gas* tersebut di dalam kontaktor membran (Lv dkk., 2011) sehingga CO₂ yang ada dalam pelarut kurang dapat ditarik keluar. Kurang maksimalnya penarikan CO₂ dalam pelarut akan mengakibatkan pelarut cepat mengalami kejenuhan dan pada akhirnya akan menurunkan fluks absorpsi CO₂. Sedangkan untuk konsentrasi gas CO₂ 99,9%, laju alir *sweep gas* tidak terlalu berpengaruh terhadap besar fluks absorpsi.

- MXG (*Mixed Gas*) = Gas Umpan - SGI (*Sweep Gas In*)

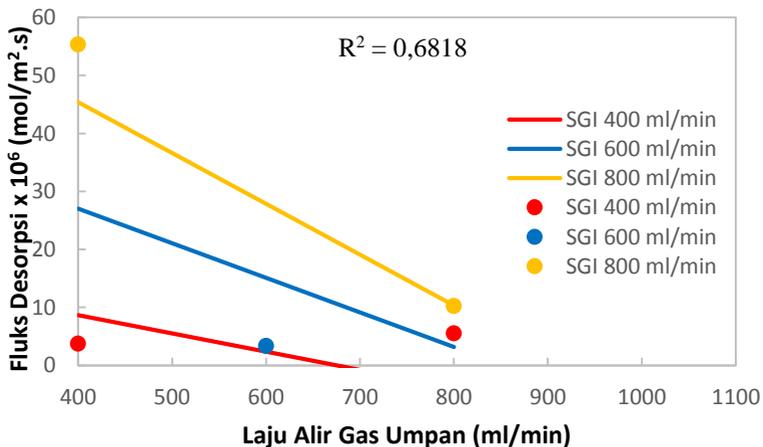


Gambar IV.4 *Response Surface* Fluks Absorpsi

Secara keseluruhan, untuk laju alir *sweep gas* yang sama, fluks absorpsi semakin besar jika laju alir gas umpan semakin besar. Hal ini dapat dilihat di **Gambar IV.4** dimana *respon surface* menunjukkan bentuk yang semakin naik seiring dengan semakin besarnya laju alir gas umpan. Untuk laju alir gas umpan yang sama, laju alir *sweep gas* tidak terlalu berpengaruh terhadap besarnya fluks absorpsi. Seperti yang terlihat di **Gambar IV.4**, grafik *response surface* menunjukkan bentuk yang datar, artinya pengaruh laju alir *sweep gas* terhadap fluks absorpsi tidak signifikan.

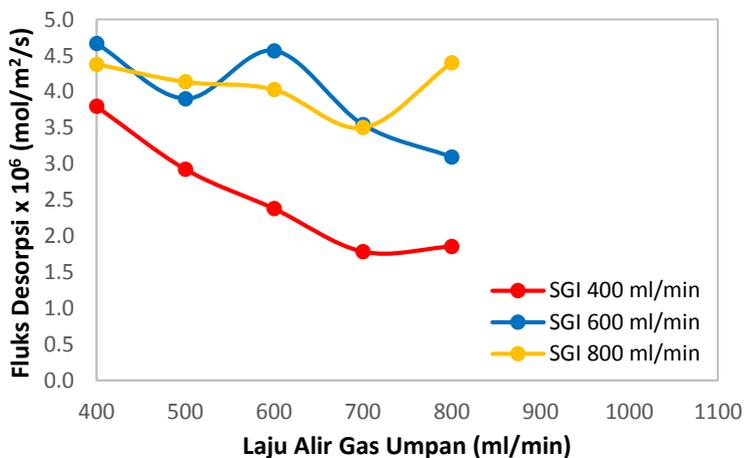


Gambar IV.5 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Desorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% dengan Pendekatan Statistik



Gambar IV.6 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Desorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik

Seperti yang terlihat di **Gambar IV.5** dan **Gambar IV.6**, titik percobaan menyimpang cukup jauh dari grafik pendekatan statistik, terbukti dengan koefisien korelasinya yang kecil. Hal ini dapat disebabkan karena adanya faktor lain yang tidak diperhitungkan dalam pendekatan model statistik, faktor pembasahan permukaan membran misalnya. Seperti yang diketahui, semakin lama membran dioperasikan akan semakin meningkatkan resiko masuknya pelarut ke dalam pori-pori membran sehingga menghambat laju perpindahan massa.



Gambar IV.7 Pengaruh Laju Alir Gas Umpam terhadap Fluks Desorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% Hasil Percobaan Eksperimental

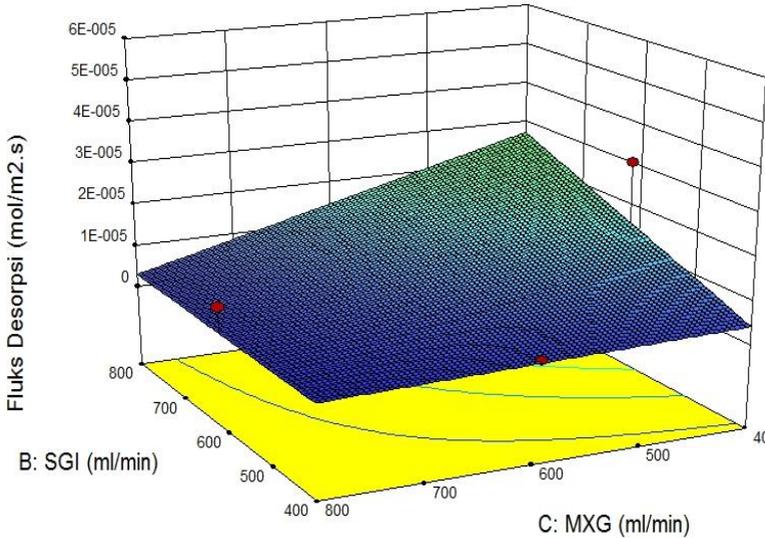
Gambar IV.5 dan **Gambar IV.6** menunjukkan grafik fluks desorpsi CO₂ pada berbagai laju alir gas umpam dan laju alir sweep gas. Dari grafik dapat dilihat bahwa semakin besar konsentrasi gas CO₂, semakin besar fluks desorpsi. Hal ini karena konsentrasi CO₂ yang besar akan mendorong fluks absorpsi yang besar. Fluks absorpsi yang besar menandakan jumlah CO₂ dalam pelarut

semakin banyak. Semakin banyaknya jumlah CO₂ dalam pelarut akan semakin meningkatkan perbedaan konsentrasi CO₂ antara pelarut dan *sweep gas* sehingga CO₂ dapat dengan cepat berdifusi ke dalam *sweep gas*.

Untuk laju alir *sweep gas* yang sama, semakin besar laju alir gas umpan, semakin kecil fluks desorpsi. Hal ini karena semakin besar laju alir gas umpan maka semakin besar fluks absorpsi. Fluks absorpsi yang semakin besar menandakan bahwa penyerapan CO₂ oleh pelarut DEA semakin besar. Dengan semakin banyaknya CO₂ dalam pelarut, dimana jumlah *sweep gas* tetap sama, maka fluks desorpsi akan semakin menurun karena jumlah *sweep gas* yang ada tidak sebanding dengan jumlah CO₂ yang ingin didesorp. Grafik fluks desorpsi untuk konsentrasi 99,9% menunjukkan hal yang senada dengan teori dimana untuk laju alir *sweep gas* yang sama, fluks desorpsi semakin turun dengan semakin naiknya laju alir gas umpan. Namun, ada penyimpangan pada tren grafik fluks desorpsi untuk konsentrasi CO₂ 40%. Terlihat bahwa ada perpotongan antar grafik, baik hasil dari percobaan maupun dari pendekatan statistik. Penyimpangan ini disebabkan karena hasil percobaan yang tidak menunjukkan kecenderungan antara variabel berubah dan variabel respon. Seperti yang dapat dilihat di **Gambar IV.7**, terutama untuk *sweep gas in* 600 ml/min dan 800 ml/min, grafik yang dihasilkan kadang turun dan kadang naik.

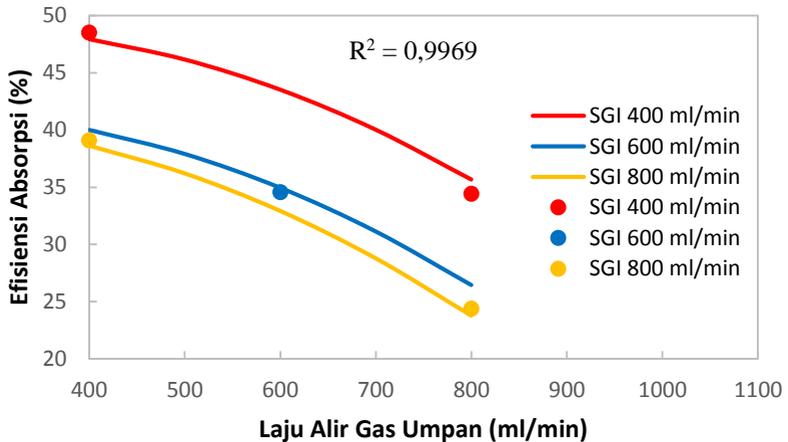
Untuk laju alir gas umpan yang sama, fluks desorpsi semakin besar dengan semakin naiknya laju alir *sweep gas*. Seperti yang telah diteliti oleh Lv dkk. (2011) bahwa semakin besar laju alir gas akan membuat turbulensi aliran sehingga akan merusak dan mengurangi ketebalan lapisan batas gas yang menyebabkan semakin mudahnya gas CO₂ berdifusi keluar.

- MXG (*Mixed Gas*) = Gas Umpan - SGI (*Sweep Gas In*)

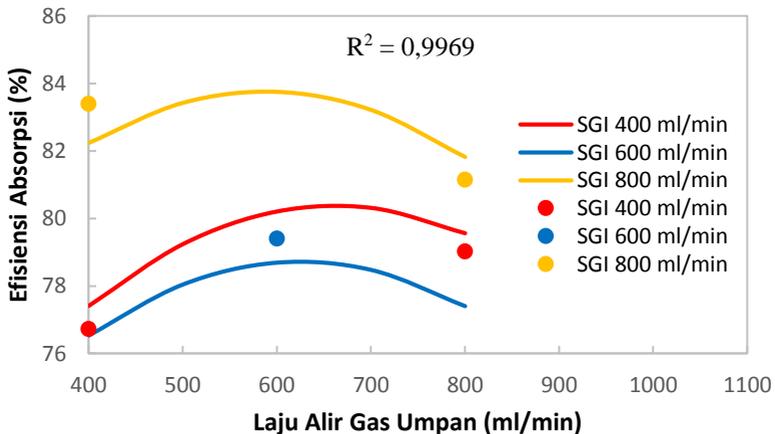


Gambar IV.8 Response Surface Fluks Desorpsi

Seperti yang terlihat di **Gambar IV.8**, secara keseluruhan, untuk laju alir *sweep gas* yang sama, fluks desorpsi naik seiring dengan turunnya laju alir gas umpan. Ini terlihat dengan semakin naiknya permukaan grafik saat laju alir gas umpan semakin kecil. Untuk laju alir gas umpan yang sama, fluks desorpsi naik seiring naiknya laju alir *sweep gas*. Ini terlihat dengan semakin naiknya permukaan grafik saat laju alir *sweep gas* semakin besar.

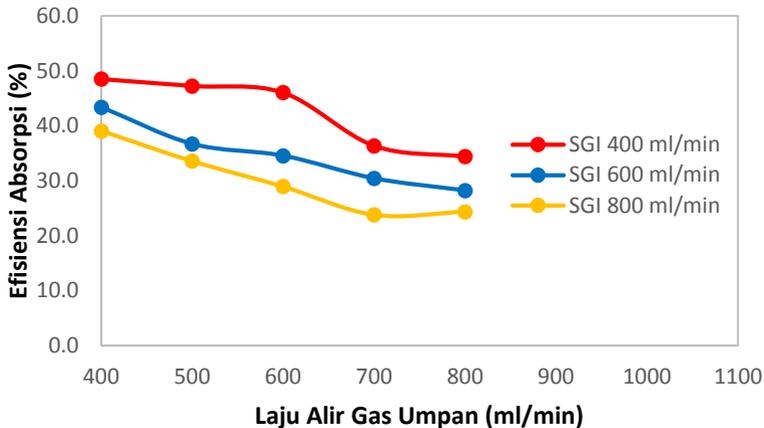


Gambar IV.9 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO₂ pada Berbagai Laju *Alir Sweep Gas In* (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% dengan Pendekatan Statistik



Gambar IV.10 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO₂ pada Berbagai Laju *Alir Sweep Gas In* (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik

Titik-titik percobaan pada grafik di **Gambar IV.9** dan **Gambar IV.10** sudah dapat mewakili hasil keseluruhan. Hal ini terbukti dengan nilai koefisien korelasi yang mendekati 1.



Gambar IV.11 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% Hasil Percobaan Eksperimental

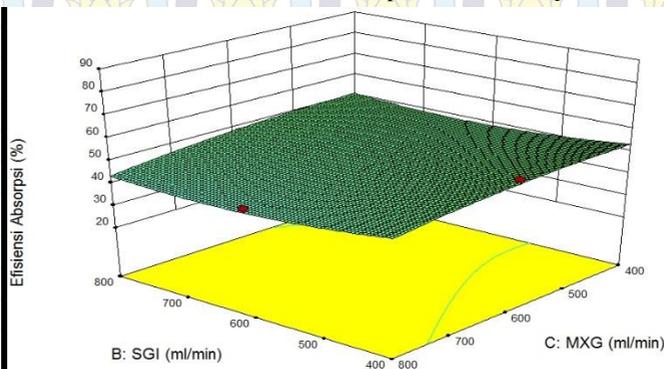
Gambar IV.9 dan **Gambar IV.10** menunjukkan grafik efisiensi absorpsi CO₂ pada berbagai laju alir gas umpan dan *sweep gas*. Seperti yang terlihat pada grafik, semakin besar konsentrasi gas CO₂, semakin besar efisiensi absorpsi. Hal ini karena semakin banyak CO₂ akan meningkatkan fluks absorpsi akibat semakin besarnya perbedaan konsentrasi. Fluks absorpsi yang meningkat menandakan banyak CO₂ yang terabsorpsi ke dalam pelarut sehingga dengan demikian efisiensi absorpsi pun meningkat.

Untuk laju alir *sweep gas* yang sama, semakin besar laju alir gas umpan, maka semakin rendah efisiensi absorpsinya. Hal ini karena pada laju alir gas umpan yang semakin cepat maka waktu tinggal gas dalam membran akan semakin singkat sehingga mengurangi waktu kontak gas dengan kontaktor membran. Hasil

tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan Lv dkk. (2011) yang menjelaskan pada kenaikan laju alir gas, waktu tinggal gas di dalam kontaktor membran semakin singkat. Waktu tinggal yang singkat menyebabkan laju difusi CO₂ melalui pori-pori membran fiber menurun sehingga menyebabkan menurunnya nilai efisiensi absorpsi CO₂. Selain itu, hasil penelitian Kim & Yang (2000) menunjukkan bahwa pada laju reaksi yang tinggi, efisiensi absorpsi akan semakin turun dengan naiknya laju alir gas umpan. Teori dan hasil penelitian terdahulu tentang efisiensi absorpsi ini sesuai untuk konsentrasi gas CO₂ 40%, baik hasil percobaan maupun pendekatan statistik. Namun, terjadi penyimpangan untuk konsentrasi gas CO₂ 99,9% dimana efisiensi absorpsi naik kemudian turun.

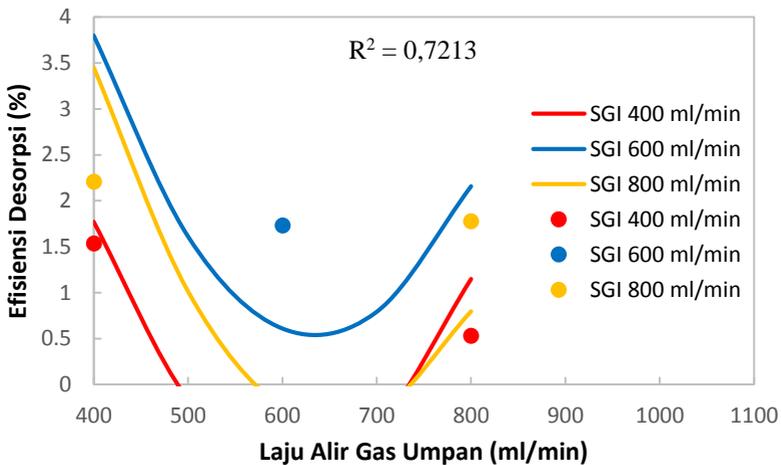
Untuk laju alir gas umpan yang sama, semakin besar laju alir *sweep gas*, efisiensi absorpsi semakin kecil. Hal ini dapat disebabkan karena laju alir *sweep gas* yang semakin besar akan mengurangi waktu tinggal *sweep gas* tersebut di dalam kontaktor membran (Lv dkk., 2011) sehingga CO₂ yang ada dalam pelarut kurang dapat ditarik keluar. Semakin banyak CO₂ dalam pelarut akan mengakibatkan pelarut semakin jenuh sehingga daya absorp pelarut semakin rendah. Penyerapan CO₂ yang rendah akan mengakibatkan efisiensi absorpsi yang rendah.

- MXG (*Mixed Gas*) = Gas Umpan - SGI (*Sweep Gas In*)

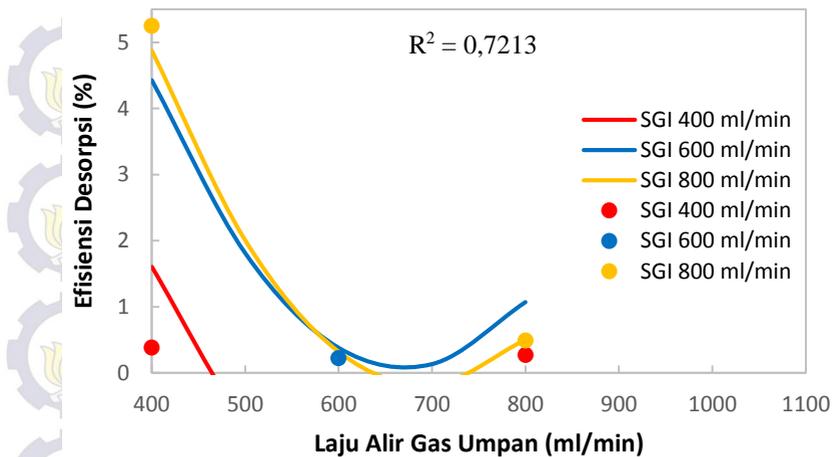


Gambar IV.12 *Response Surface* Efisiensi Absorpsi

Seperti yang terlihat di **Gambar IV.12**, secara keseluruhan, untuk laju alir *sweep gas* yang sama, efisiensi absorpsi naik sering dengan turunnya laju alir gas umpan. Ini terlihat dengan semakin naiknya permukaan grafik saat laju alir gas umpan semakin kecil. Untuk laju alir gas umpan yang sama, efisiensi absorpsi naik seiring dengan semakin turunnya laju alir *sweep gas*. Ini terlihat dengan permukaan grafik yang naik saat laju alir *sweep gas* semakin turun.

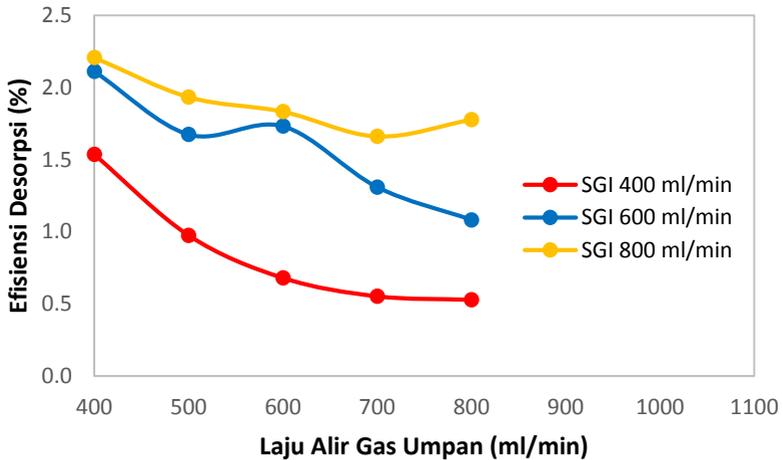


Gambar IV.13 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Desorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% dengan Pendekatan Statistik



Gambar IV.14 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Desorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik

Seperti yang terlihat di **Gambar IV.13** dan **Gambar IV.14**, titik percobaan menyimpang cukup jauh dari grafik pendekatan statistik, terbukti dengan koefisien korelasinya yang kecil. Hal ini dapat disebabkan karena adanya faktor lain yang tidak diperhitungkan dalam pendekatan model statistik, faktor jumlah fiber membran misalnya. Seperti yang diketahui, semakin banyak fiber membran yang digunakan akan semakin meningkatkan luas kontak gas-liquid yang pada akhirnya dapat meningkatkan efisiensi pemisahan CO₂, termasuk efisiensi desorpsi.



Gambar IV.15 Pengaruh Laju Alir Gas Umpam terhadap Efisiensi Desorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% Hasil Percobaan Eksperimental

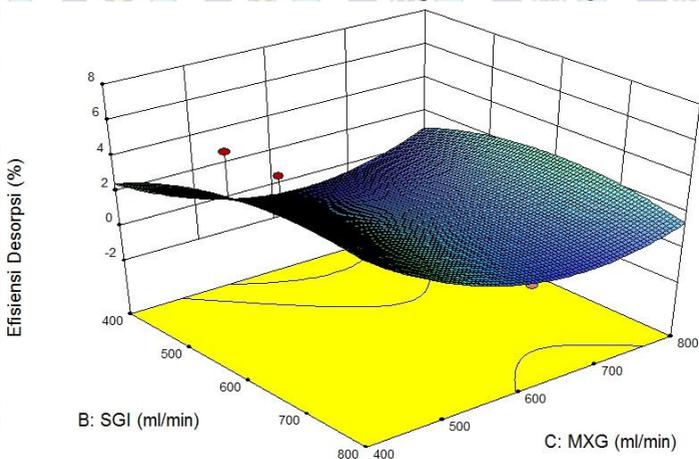
Gambar IV.13 dan **Gambar IV.14** menunjukkan grafik efisiensi desorpsi CO₂ pada berbagai laju alir gas umpam dan *sweep gas*. Seperti yang terlihat pada grafik, konsentrasi gas CO₂ cenderung tidak berpengaruh terhadap efisiensi desorpsi.

Untuk laju alir *sweep gas* yang sama, semakin besar laju alir gas umpam harusnya semakin kecil efisiensi desorpsi. Hal ini karena pada laju alir gas umpam yang semakin besar, waktu tinggal gas dalam kontaktor membran semakin singkat (Lv dkk., 2011). Waktu tinggal yang singkat mengakibatkan CO₂ yang terserap ke dalam pelarut kurang maksimal sehingga jumlah CO₂ dalam pelarut semakin kecil. Semakin kecilnya jumlah CO₂ dalam pelarut berakibat pada semakin kecilnya fluks desorpsi karena jumlah CO₂ yang ingin didesorp semakin kecil pula. Hasil titik-titik percobaan untuk konsentrasi CO₂ 40% menunjukkan hal yang sama dengan teori dimana semakin besar laju alir gas umpam, efisiensi desorpsi semakin kecil. Namun, hasil dari pendekatan statistik tidak

menunjukkan kesesuaian dengan teori, baik untuk konsentrasi gas CO₂ 40% maupun 99,9%. Tren efisiensi desorpsi turun menuju titik minimal kemudian berangsur naik membentuk kurva U.

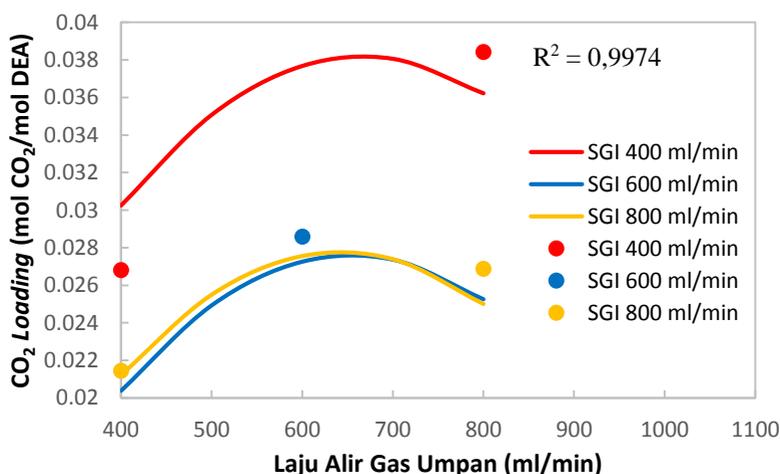
Untuk laju alir gas umpan yang sama, seharusnya semakin besar laju alir *sweep gas*, maka efisiensi desorpsi akan semakin kecil. Seperti pada efisiensi absorpsi, pada laju alir *sweep gas* yang semakin cepat, waktu tinggal *sweep gas* dalam membran akan semakin singkat sehingga mengurangi waktu kontak gas dengan kontaktor membran. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan Lv dkk. (2011) yang menjelaskan pada kenaikan laju alir gas, waktu tinggal gas di dalam kontaktor membran semakin singkat. Waktu tinggal yang singkat menyebabkan laju difusi CO₂ melalui pori-pori membran fiber menurun sehingga menyebabkan menurunnya nilai efisiensi desorpsi CO₂. Hasil percobaan efisiensi desorpsi untuk konsentrasi gas CO₂ 99,9% cukup sesuai dengan teori. Namun, untuk konsentrasi gas CO₂ 40% terjadi penyimpangan walau tidak signifikan. Seharusnya grafik untuk laju alir *sweep gas in* 600 ml/min (warna biru) berada di antara grafik jingga dan merah.

- MXG (*Mixed Gas*) = Gas Umpan - SGI (*Sweep Gas In*)



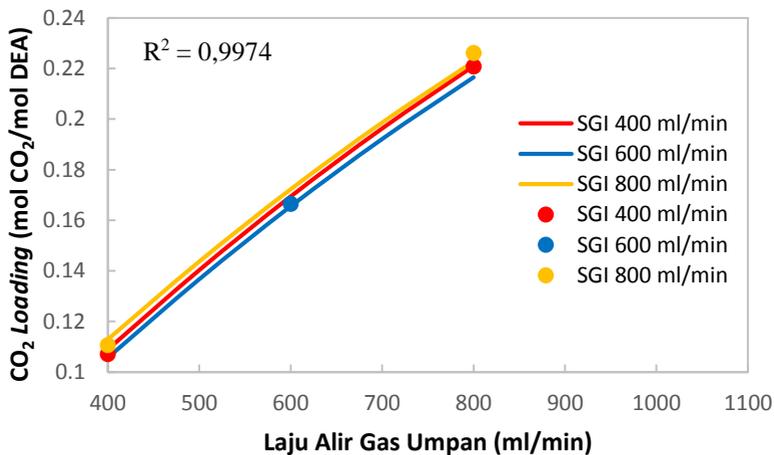
Gambar IV.16 *Response Surface* Efisiensi Desorpsi

Seperti yang terlihat di **Gambar IV.16**, secara keseluruhan, untuk laju alir *sweep gas* yang sama, efisiensi desorpsi turun kemudian naik sering dengan naiknya laju alir gas umpan. Ini terlihat dengan permukaan grafik yang turun kemudian naik saat laju alir gas umpan semakin besar. Untuk laju alir gas umpan yang sama, efisiensi desorpsi naik kemudian turun seiring dengan naiknya laju alir *sweep gas*. Ini terlihat dengan permukaan grafik yang naik kemudian turun saat laju alir *sweep gas* semakin besar.

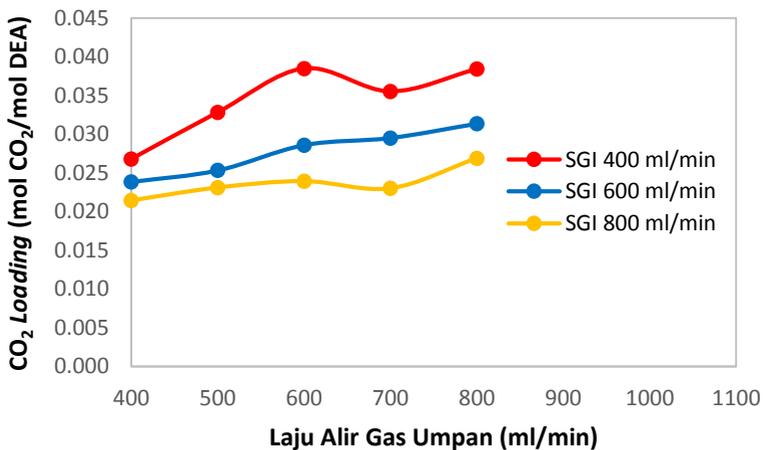


Gambar IV.17 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO₂ Loading pada Berbagai Laju Alir *Sweep Gas In* (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% dengan Pendekatan Statistik

Titik-titik percobaan pada grafik di **Gambar IV.17** dan **Gambar IV.18** sudah dapat mewakili hasil keseluruhan. Hal ini terbukti dengan nilai koefisien korelasi yang mendekati 1.



Gambar IV.18 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO₂ Loading pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 99,9% dengan Pendekatan Statististik



Gambar IV.19 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO₂ Loading pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% dari Percobaan Eksperimental

Gambar IV.17 dan **Gambar IV.18** menunjukkan grafik CO_2 loading pelarut DEA pada berbagai laju alir gas umpan dan *sweep gas*. CO_2 loading adalah jumlah mol CO_2 yang terdapat dalam satu mol pelarut. Seperti yang terlihat pada grafik, semakin besar konsentrasi gas CO_2 , semakin besar CO_2 loading. Konsentrasi CO_2 yang semakin besar akan membuat perbedaan konsentrasi semakin besar sehingga CO_2 dapat dengan cepat berdifusi ke dalam pelarut DEA. Jumlah CO_2 yang besar dalam pelarut akan meningkatkan nilai CO_2 loading.

Untuk laju alir *sweep gas* yang sama, semakin besar laju alir gas umpan, maka akan semakin besar fluks absorpsi (Lv dkk., 2011). Semakin besar fluks absorpsi berarti semakin banyak CO_2 yang diserap oleh pelarut sehingga memperbesar CO_2 loading.

Reaksi *overall* antara CO_2 -DEA dapat dituliskan sebagai berikut.

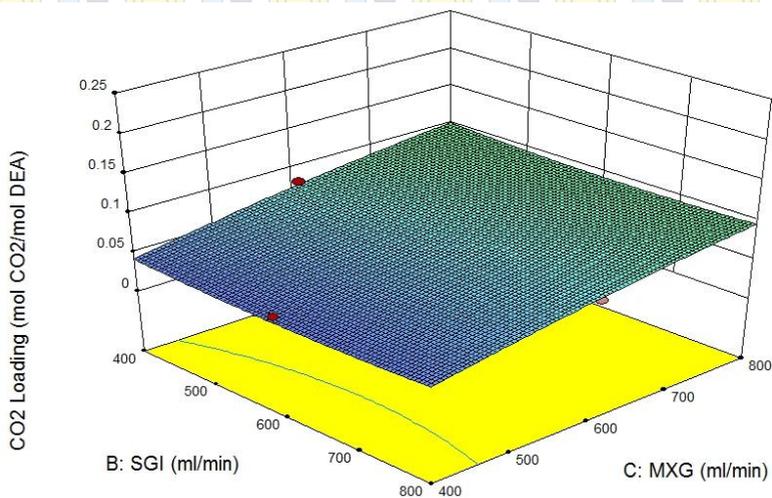


Dari reaksi tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa CO_2 loading maksimal dari pelarut DEA adalah 1 mol CO_2 per 2 mol DEA, atau 0,5 mol CO_2 /mol DEA (Chakma dkk., 1990). Sedangkan dari grafik pada **Gambar IV.17** dan **Gambar IV.18**, CO_2 loading yang paling tinggi hanya tercatat sekitar 0,22 mol CO_2 /mol DEA. Ini mengindikasikan bahwa penyerapan CO_2 oleh pelarut kurang maksimal. Hal ini dapat disebabkan oleh fiber membran yang mengalami pembasahan. Fenomena pembasahan yang terjadi dapat membuat pori-pori membran tertutup larutan sehingga hambatan total sistem bertambah (Dindore dkk., 2004). Bertambahnya hambatan ini berpengaruh pada rendahnya difusi gas melewati pori membran untuk sampai ke pelarut.

Untuk laju alir gas umpan yang sama, CO_2 loading pada kedua konsentrasi menunjukkan hasil yang cukup berbeda. Harusnya semakin kecil laju alir *sweep gas*, semakin kecil CO_2 loading. Hal ini karena laju alir *sweep gas* yang kecil memiliki waktu tinggal yang lebih lama di dalam kontaktor membran (Lv dkk., 2011) sehingga CO_2 yang ada dalam pelarut dapat ditarik keluar dengan optimal. Penarikan CO_2 yang optimal dari pelarut

akan mengakibatkan jumlah CO₂ dalam pelarut semakin sedikit sehingga CO₂ loading pun menjadi kecil. Teori ini tidak sesuai untuk konsentrasi gas CO₂ 40%, baik dari hasil percobaan maupun dari pendekatan statistik. Sedangkan untuk konsentrasi gas CO₂ 99,9%, laju alir *sweep gas* tidak terlalu berpengaruh terhadap besar CO₂ loading.

- MXG (*Mixed Gas*) = Gas Umpan - SGI (*Sweep Gas In*)



Gambar IV.20 Response Surface CO₂ Loading

Seperti yang terlihat di **Gambar IV.20**, secara keseluruhan, untuk laju alir *sweep gas* yang sama, CO₂ loading naik seiring dengan naiknya laju alir gas umpan. Ini terlihat dengan semakin naiknya permukaan grafik saat laju alir gas umpan semakin besar. Untuk laju alir gas umpan yang sama, laju alir *sweep gas* tidak terlalu berpengaruh terhadap besar CO₂ loading. Ini terlihat pada berbagai laju alir *sweep gas*, permukaan grafik cenderung rata.

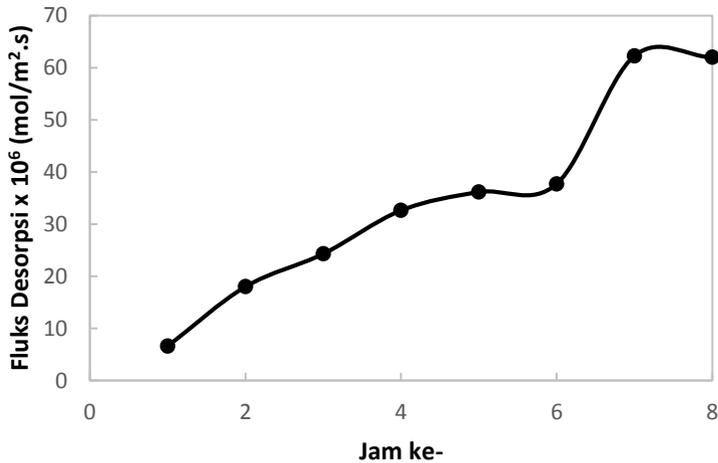
Dari seluruh grafik yang telah disajikan di atas dapat disimpulkan bahwa proses absorpsi dalam membran terjadi lebih baik daripada proses desorpsi. Hal ini ditunjukkan dengan koefisien korelasi yang mendekati satu, sedangkan untuk proses

desorpsi (fluks dan efisiensi desorpsi) koefisien korelasinya kecil sehingga belum bisa menjelaskan tren grafik hasil percobaan. Buruknya performa desorpsi ini dapat disebabkan karena CO₂ dalam larutan DEA telah bereaksi menjadi bentuk lain yang sulit untuk ditarik masuk ke dalam *sweep gas* (Chakma dkk, 1990). Selain itu, jumlah fiber membran untuk proses desorpsi kurang banyak sehingga sulit untuk mengimbangi besar fluks absorpsi. Jumlah fiber membran desorpsi seyogyanya lebih banyak 10-100 kali jumlah fiber membran absorpsi agar besar fluks keduanya berimbang seperti yang dilakukan pada penelitian Kumazawa (2000) dan Shimada dkk. (2006).

Kelebihan penelitian ini jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu dimana proses absorpsi dan desorpsi juga terjadi secara simultan dalam satu modul adalah fluks absorpsi yang cukup besar hingga mencapai $2,306 \times 10^{-3}$ mol/m².s. Sebagai perbandingan, penelitian yang dilakukan oleh Shimada dkk. (2006) menghasilkan fluks absorpsi maksimal sebesar 1×10^{-3} mol/m².s, sedangkan penelitian Mansourizadeh dkk. (2011) menghasilkan fluks absorpsi maksimal sebesar $8,5 \times 10^{-4}$ mol/m².s. Walaupun dari hasil percobaan fluks desorpsi terlihat kurang maksimal, namun jika dibandingkan dengan penelitian Shimada dkk. (2006) dan Mansourizadeh dkk. (2011), fluks desorpsi penelitian ini jauh lebih baik. Fluks desorpsi pada penelitian ini mencapai $4,5 \times 10^{-5}$ mol/m².s, sedangkan pada penelitian Shimada dkk. (2006) sebesar 1×10^{-5} dan pada penelitian Mansourizadeh dkk. (2011) hanya 3×10^{-8} mol/m².s. Selain itu, luas permukaan kontak gas-liquid pada penelitian ini jauh lebih besar dibanding luas permukaan kontak pada kedua penelitian yang disebutkan sebelumnya, dengan catatan dimensi alat yang digunakan hampir sama. Pada penelitian Shimada dkk. (2006), luas kontak gas-liquid sebesar 754 cm², pada penelitian Mansourizadeh dkk. (2011) hanya 240 cm², sedangkan luas kontak gas-liquid pada penelitian ini mencapai 2.119 cm². Luas kontak yang besar inilah yang menghasilkan laju perpindahan massa yang besar pula.

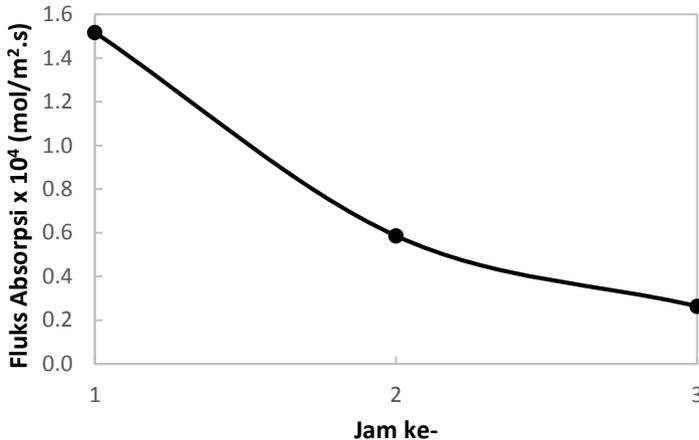
IV.2 Uji Kinerja

Variabel yang digunakan untuk uji kinerja adalah variabel optimal yang diperoleh dari uji pengaruh parameter operasi. Variabel optimal ini merupakan rekomendasi dari DesignExpert® 9 dari berbagai hasil variabel respon terhadap variabel berubah. Variabel optimal tersebut adalah laju alir gas umpan 800 ml/min dan laju alir *sweep gas in* 400 ml/min. Untuk konsentrasi gas CO₂ dipilih konsentrasi 40% karena mewakili konsentrasi CO₂ dalam gas alam. Uji kinerja dilakukan selama 8 jam *non-stop* untuk mengetahui performa kontaktor membran yang diukur berdasarkan fluks absorpsi dan desorpsi serta efisiensi absorpsi dan desorpsi.



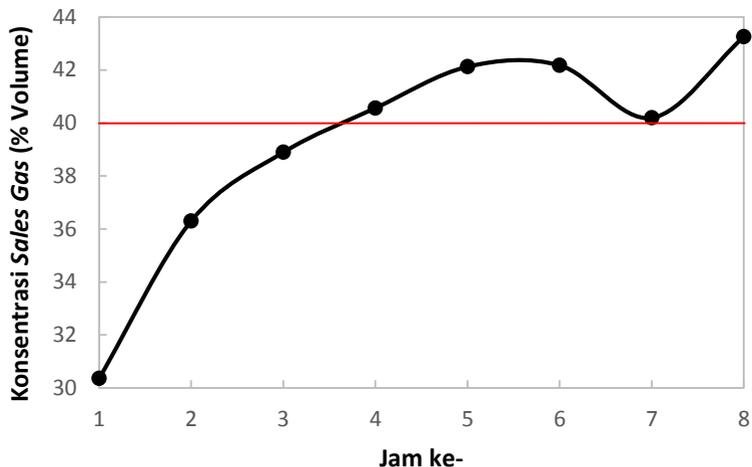
Gambar IV.21 Fluks Desorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO₂ 40%

Dari Gambar IV.21 dapat dilihat bahwa fluks desorpsi semakin lama semakin meningkat. Hal ini dapat disebabkan karena pelarut sudah semakin jenuh dengan CO₂ sehingga dengan adanya perbedaan konsentrasi CO₂ yang besar, CO₂ dalam pelarut semakin banyak yang berdifusi ke dalam *sweep gas*.



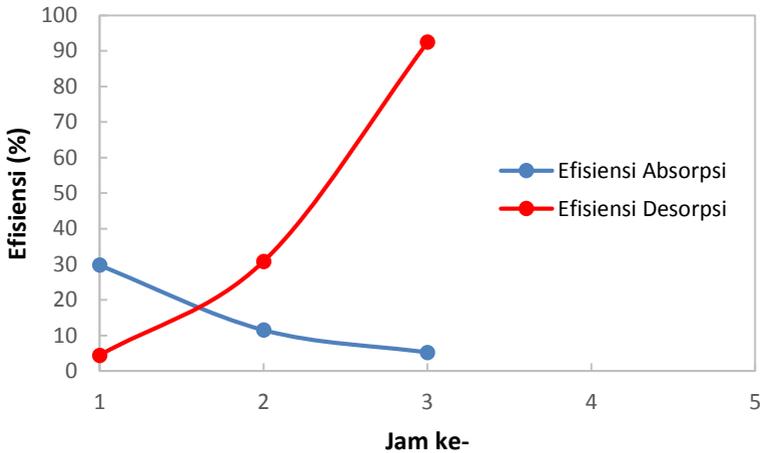
Gambar IV.22 Fluks Absorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO₂ 40%

Pada tiga jam pertama uji kinerja, fluks absorpsi semakin lama semakin menurun. Hal ini dapat disebabkan karena pelarut yang mulai jenuh sehingga kemampuan mengabsorpsi CO₂ juga menurun. Setelah tiga jam uji kinerja, performa kontaktor membran untuk absorpsi sudah mencapai titik minimal. Seperti yang terlihat pada **Gambar IV.23**, konsentrasi *sales gas* yang keluar kontaktor lebih besar dari konsentrasi gas CO₂ masuk (ditandai dengan garis lurus merah pada grafik). Ini menandakan bahwa fungsi absorpsi pada kontaktor membran sudah tidak lagi berjalan. Konsentrasi CO₂ dalam *sales gas* yang lebih besar dari konsentrasi CO₂ masuk dapat disebabkan adanya gas CO₂ yang terperangkap dalam membran yang terdorong keluar. Gas CO₂ yang terperangkap dalam membran mengindikasikan bahwa gas tersebut tidak terabsorpsi ke dalam pelarut. Tidak terabsorpsinya CO₂ dalam pelarut dapat disebabkan oleh pelarut yang mulai jenuh atau permukaan membran yang sudah mengalami pembasahan yang mengakibatkan pori-pori membran tertutup (Dindore dkk., 2004).



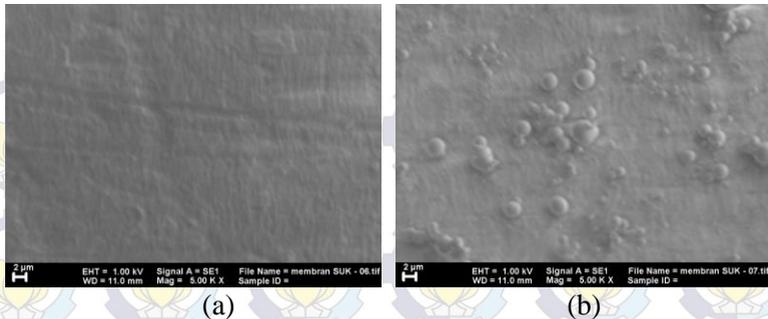
Gambar IV.23 Konsentrasi CO_2 dalam *Sales Gas* Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO_2 40%

Efisiensi absorpsi dan desorpsi menunjukkan tren yang sama dengan fluks absorpsi dan desorpsi. Semakin lama uji kinerja, efisiensi absorpsi semakin turun dan efisiensi desorpsi semakin naik. Efisiensi absorpsi yang menurun dapat disebabkan karena pelarut sudah tidak lagi mampu menyerap CO_2 dan permukaan membran yang telah mengalami pembasahan. Efisiensi desorpsi yang semakin naik karena pelarut sudah semakin jenuh dengan CO_2 sehingga dengan adanya perbedaan konsentrasi CO_2 yang besar, jumlah CO_2 dalam pelarut yang berdifusi ke dalam *sweep gas* semakin banyak.



Gambar IV.24 Efisiensi Absorpsi dan Desorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas* In 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO₂ 40%

Pengaruh waktu kontak antara pelarut dan permukaan membran menyebabkan perubahan morfologi membran akibat terjadi pembasahan membran dapat diamati dari hasil analisa SEM seperti disajikan dalam **Gambar IV.25**. Hasil menunjukkan perbedaan kekasaran dan perubahan ukuran pori membran. Perubahan tersebut akibat adanya intrusi pelarut ke dalam pori membran dan memperbesar pori membran. Intrusi pelarut tersebut karena adanya gaya lateral pada dinding pori menyebabkan bergesernya dinding. Pergeseran dinding pori yang berukuran lebih besar menyebabkan pori lebih kecil akan menurun dan memungkinkan tertutup (Dindore dkk., 2004). Adanya pelarut dalam pori membran menyebabkan hambatan total pada sistem membesar sehingga laju perpindahan massa menjadi kecil (Qi & Cussler, 1985).



Gambar IV.25 Hasil SEM Permukaan Membran PP (a) sebelum perendaman; (b) setelah perendaman

Selama percobaan, pembasahan pada membran dapat diidentifikasi dengan adanya cairan (pelarut) yang mengembun di sepanjang selang gas seperti yang terlihat pada **Gambar IV.26**. Adanya pelarut di sepanjang selang gas mengindikasikan bahwa sifat hidrofobisitas membran sudah menurun sehingga pelarut dapat mengintrusi masuk ke dalam pori-pori membran. Pelarut yang mengintrusi masuk ke pori membran akan terbawa oleh gas yang melewati lumen membran.



Gambar IV.26 Pelarut yang Terbawa oleh Aliran Gas

Pembasahan membran dapat dicegah dengan menjalankan kontaktor membran pada tekanan operasi pada sisi pelarut lebih rendah dibanding tekanan minimum cairan. Selain itu, ada beberapa hal yang juga dapat dipertimbangkan, yaitu (Li & Chen, 2005):

1. Menggunakan membran hidrofobik agar membran lebih tahan terhadap pembasahan oleh pelarut.
2. Modifikasi permukaan membran untuk meningkatkan hidrofobisitas membran.
3. Membran komposit, yaitu membran dengan lapisan atas tidak berpori dan lapisan berikutnya mikroporos yang efektif mencegah pembasahan.
4. Memilih membran *hollow fiber* yang lebih tidak berpori (*dense*) karena lebih fleksibel dalam tekanan gas umpan.
5. Memilih pelarut dengan tegangan permukaan (*surface tension*) yang sesuai dimana tegangan permukaan rendah memudahkan pelarut menembus pori membran.
6. Optimisasi kondisi operasi untuk meningkatkan kinerja absorpsi keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

Atchariyawut, S., Feng, C., Wang, R., Jiratananon, R., Liang, D.T. (2006). "Effect of Membrane Structure on Mass Transfer in The Membrane Gas-Liquid Contacting Process Using Microporous PVDF Hollow Fibers." *Journal of Membrane Science*, **285**, 272-281.

Chakma, A., E. Chornet, R.P. Overend, W.H. Dawson (1990). "Absorption of CO₂ by Aqueous Diethanolamine (DEA) Solutions in a High Shear Jet Absorber." *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **68**.

Cooney, D.O., Jackson, C. C. (1989). "Gas Absorption in a Hollow Fiber Device". *Journal of Chemical Engineering Communications*, **79 (1)**, 153-163.

deMontigny, D., Tontiwachwuthikul, P., Chakma, A. (2006). "Using Polypropylene and Polytetrafluoroethylene Membranes in a Membrane Contactor for CO₂ Absorption." *Journal of Membrane Science*, **277**, 99-107.

Dindore, V.Y., Brillman, D.W.F., Geuzebroek, F.H., Versteeg, G.F. (2004). "Membrane-Solvent Selection for CO₂ Removal Using Membrane Gas-Liquid Contactors." *Journal of Separation and Purification Technology*, **40**, 133-145.

Feron, P.H.M. & Jansen, A.E. (1995). "Capture of Carbon Dioxide Using Membrane Gas Absorption and Reuse in the Horticultural Industry." *Journal of Energy Conversion and Management*, **36**, 411-414.

- Feron, P.H.M. & Jansen, A.E. (2002). "CO₂ Separation with Polyolefin Membrane Contactors and Dedicated Absorption Liquid: Performance and Prospects." *Separation and Purification Technology*, **27**, 231-242.
- Gabelman, A. & Hwang, S.T. (1999). "Hollow Fiber Membrane Contactors." *Journal of Membrane Science*, **159**, 61-106.
- Geankoplis, Christie J. 2003. *Transport Process and Separation Process Principles*. New Jersey: Prentice Hall.
- Guha, A.K., Majumdar, S., Sirkar, K.K. (1990). "Facilitated Transport of CO₂ Through an Immobilized Liquid Membrane of Aqueous Diethanolamine". *Industrial Engineering Chemical Research*, **29**, 2093-2100.
- Hedayat, M., Mohammad S., Seyyed A.M. (2011). "Simultaneous Separation of H₂S dan CO₂ Fom Natural Gas by Hollow Fiber Membrane Contactor Using Mixture of Alkanolamines." *Journal of Membrane Science*, **377**, 191-197.
- Karoor, S. & Sirkar, K.K (1993). "Gas Absorption Studies in Microporous Hollow Fiber Membrane Modules." *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **32**, 674-681.
- Kartohardjono, S., Anggara, Subihi, Yuliusman (2007). "Absorpsi CO₂ dari Campurannya dengan CH₄ dan N₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Pelarut Air." Jakarta: Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.

Khaisri, S., deMontigny, D., Tontiwachwuthikul, P., Jiraratananon, R. (2011). "CO₂ Stripping from Monoethanolamine Using a Membrane Contactor." *Journal of Membrane Science*, **376**, 110-118.

Kidnay, Arthur J. 2006. *Fundamentals of Natural Gas Processing*. New York: CRC Press.

Kim, Y.S. & Yang, S.M. (2000). "Absorption of Carbon Dioxide Through Hollow Fiber Membranes Using Various Aqueous Absorbents." *Journal of Separation and Purification Technology*, **21**, 101-109.

Kohl, Arthur & Richard Nielsen. 1997. *Gas Purification*. Texas: Gulf Publishing.

Kosaraju P., Kovvali, A.S., Korikov, A., Sirkar, K.K. (2005). "Hollow Fiber Membrane Contactor Based CO₂ Absorption-Stripping Using Novel Solvents and Membranes." *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **44**, 1250-1258.

Kreulen, H., Smolders, C.A., Versteeg, G.F. van Swaaij, W.P.M. (1993). "Determination of Mass Transfer Rates in Wetted and Non Wetted Microporous Membranes." *Journal of Chemical Engineering Science*, **48**, 2093-2102.

Kumar, P.S., Hogendoorn, J.A., Feron, P.H.M., Versteeg, G.F. (2002). "New Absorption Liquids for the Removal of CO₂ from Dilute Gas Streams Using Membrane Contactor." *Journal of Chemical Engineering Science*, **57**, 1639-1651.

Kumazawa, H. (2000). "Absorption and Desorption of CO₂ by Aqueous Solution of Sterically Hindered 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol in Hydrophobic Microporous Hollow Fiber Contained Contactors." *Journal of Chemical Engineering Science*, **55**, 5531-5543.

Li, J.L. & Chen, B.H. (2005). "Review of CO₂ Absorption Using Chemical Solvents in Hollow Fiber Membrane Contactors." *Journal of Separation and Purification Technology* **41**, 109–122.

Lv, Y., Xinhai Y., Shan-Tung T., Jinyue Y., Erik D. (2011). "Experimental Studies on Simultaneous Removal of CO₂ and SO₂ in a Polypropylene Hollow Fiber Membrane Contactor." *Journal of Applied Energy*.

Majumdar, S., Guha, A.K., Sirkar, K.K., (1988). "A New Liquid Membrane Technique for Gas Separation." *A.I.Ch.E. Journal*, **34**, 1135–1145.

Mansourizadeh, A. & Ismail, A.F. (2009). "Hollow Fiber Gas-Liquid Membrane Contactors for Acid Gas Capture: Review." *Journal of Hazardous Materials*, **171**, 38-53.

Mansourizadeh, Amir (2011). "Experimental Study of CO₂ Absorption/Stripping via PVDF Hollow Fiber Membrane Contactor." *Journal of Chemical Engineering Research and Design*, **273**, 386-390.

Mansourizadeh, A. & Ismail, A.F. (2011). "CO₂ Stripping from Water Through Porous PVDF Hollow Fiber Membrane Contactor." *Journal of Desalination*, **273**, 386-390.

Matsumoto, H., Kitamura, H., Kamata, T., Ishibashi, M., Ota, H. (1995). "Effect of Membrane Properties of Microporous Hollow Fiber Gas-Liquid Contactor on CO₂ Removal from Thermal Power Plant Flue Gas." *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **28**, 125-128.

Mulder, M. 1996. *Basic Principles of Membrane Technology* 2nd Ed. Dordrecht: Kluwer Academic.

Nii, S., Iwata, Y., Takahashi, K., Takeuchi, H. (1995). "Regeneration of CO₂-Loaded Carbonate Solution by Reducing Pressure." *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **28**, 148-153.

Nishikawa, N., Ishibashi, M., Ohta, H., Akutsu, N., Matsumoto, H., Kamata, T., Kitamura, H. (1995). "CO₂ Removal by Hollow Fiber Gas-Liquid Contactors." *Journal of Energy Conversion and Management*, **36**, 415-418.

Perry, Robert H. & Don W. Green. 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. New York: McGraw-Hill.

Qi, Z. & Cussler, E.L. (1985). "Microporous Hollow Fibers For Gas Absorption Mass Transfer in the Liquid." *Journal of Membrane science*, **23**, 321-332.

Rahmawati, Y. 2014. Kontaktor Membran Hollow Fiber Menyalang Ganda untuk Absorpsi dan Desorpsi CO₂. Bandung: Jurusan Teknik Kimia Institut Teknologi Bandung.

Rangwala, H.A. (1996). "Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Solutions Using Hollow Fiber Membrane Contactors." *Journal of Membrane Science*, **112**, 229-240.

Shimada, K., Seekkuarachchi, I.N., Kumazawa, H. (2006). "Absorption of CO₂ into Aqueous Solutions of Sterically Hindered Methyl Aminoethanol Using a Hydrophobic Microporous Hollow Fiber Contained Contactor." *Chemical Engineering Communication*, **193**, 38-54.

Wang, K.L. & Cussler, E.L. (1993). "Baffled Membrane Modules Made with Hollow Fiber Fabric." *Journal of Membrane Science*, **85**, 265-278.

Wang, S., Hawboldt, K., Abdi, M.A. (2006). "Novel Dual-Membrane Gas-Liquid Contactors: Modelling and Concept Analysis." *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **45**, 7882-7891.

Yan, S.P., Fang, M.X., Zhang, W.F., Wang, S.Y., Luo, Z.Y., Cen, K.F. (2007). "Experimental Study on the Separation of CO₂ from Flue Gas Using Hollow Fiber Membrane Contactors without Wetting." *Journal of Fuel Processing Technology*, **88**, 501-511.

Yeon, S.H., Sea, B., Park Y.I., Lee, K.S., Lee, K.H. (2004). "Absorption of Carbon Dioxide Characterized by Using the Absorbent Composed of Piperazine and Triethanolamine." *Journal of Separation Science and Technology*, **39**, 3281-3300.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Fluks absorpsi tertinggi mencapai $2,306 \times 10^{-3}$ mol/m².s.

Pengaruh parameter operasi terhadap fluks absorpsi:

- fluks absorpsi semakin besar jika konsentrasi gas CO₂ semakin besar.
- fluks absorpsi semakin besar jika laju alir gas CO₂ (gas umpan) semakin besar,
- laju alir *sweep gas* cenderung tidak berpengaruh terhadap besar fluks absorpsi.

Fluks desorpsi tertinggi mencapai $4,536 \times 10^{-5}$ mol/m².s.

Pengaruh parameter operasi terhadap fluks desorpsi:

- fluks desorpsi semakin besar jika konsentrasi gas CO₂ semakin besar,
- fluks desorpsi semakin besar jika laju alir gas CO₂ (gas umpan) semakin kecil,
- fluks desorpsi semakin besar jika laju alir *sweep gas* semakin besar.

Efisiensi absorpsi tertinggi mencapai 83,747%. Pengaruh parameter operasi terhadap efisiensi absorpsi:

- efisiensi absorpsi semakin besar jika konsentrasi gas CO₂ semakin besar,
- efisiensi absorpsi semakin besar jika laju alir gas CO₂ (gas umpan) semakin kecil,
- efisiensi absorpsi semakin besar jika laju alir *sweep gas* semakin kecil.

Efisiensi desorpsi tertinggi 4,873%. Pengaruh parameter operasi terhadap efisiensi desorpsi:

- konsentrasi gas CO₂ cenderung tidak berpengaruh terhadap besar efisiensi desorpsi,

- semakin besar laju alir gas CO₂ (gas umpan), efisiensi desorpsi turun kemudian naik,
- semakin besar laju alir *sweep gas*, efisiensi desorpsi naik kemudian turun.

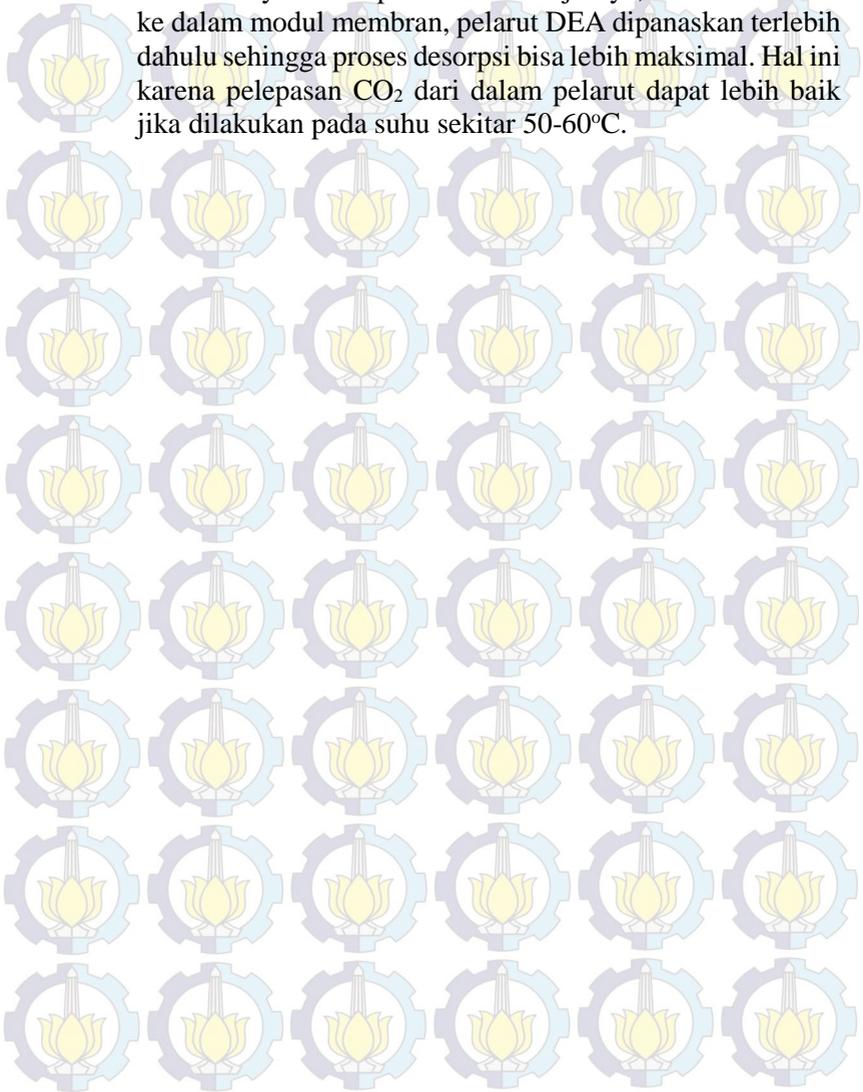
2. Uji kinerja:

- Selama tiga jam pertama, fluks absorpsi semakin turun hingga $2,63 \times 10^{-5}$ mol/m².s. Lebih dari tiga jam, fungsi absorpsi dari membran sudah tidak bekerja dengan baik.
- Fluks desorpsi semakin naik setiap jam uji kinerja hingga mencapai $6,202 \times 10^{-5}$.
- Selama tiga jam pertama, efisiensi absorpsi semakin turun hingga 5,181%, sedangkan efisiensi desorpsi semakin naik hingga mencapai 92,437%. Lebih dari tiga jam, baik efisiensi absorpsi maupun efisiensi desorpsi sudah tidak berjalan dengan baik.
- Secara keseluruhan, kontaktor membran mampu menjalankan fungsi absorpsi dan desorpsi selama tiga jam uji kinerja.

V.2 Saran

1. Agar mendapat hasil yang maksimal saat uji kinerja, fiber membran harus dalam keadaan baru (belum pernah dipakai). Dengan demikian, harus dibuat dua modul membran, yang pertama untuk uji pengaruh parameter operasi, dan yang kedua untuk uji kinerja.
2. Sampel gas yang akan diuji sebaiknya dimasukkan ke dalam *gas holder*. Sebab, *plastic bag* yang digunakan rentan bocor sehingga membuat hasil analisa kurang tepat.
3. Untuk penelitian selanjutnya, pelarut DEA dicoba untuk disirkulasi untuk menghindari lamanya waktu perendaman membran yang dapat mengakibatkan membran cepat mengalami pembasahan.

4. Hasil penelitian ini untuk proses desorpsi masih kurang baik. Ada baiknya untuk penelitian selanjutnya, sebelum masuk ke dalam modul membran, pelarut DEA dipanaskan terlebih dahulu sehingga proses desorpsi bisa lebih maksimal. Hal ini karena pelepasan CO_2 dari dalam pelarut dapat lebih baik jika dilakukan pada suhu sekitar $50\text{-}60^\circ\text{C}$.





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

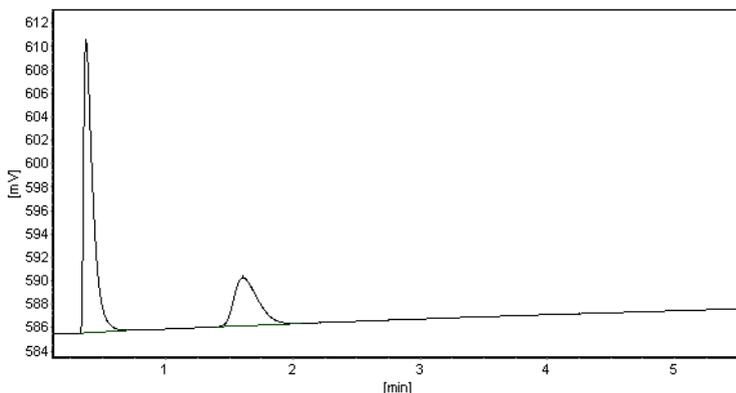
LAMPIRAN A

SLG-1

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-1
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.37	24937	125643	70.05237	BB
2	CO2	1.605	4112	53713	29.94763	BB
TOTAL			29049	179356	100	

SGO-1

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-1

Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

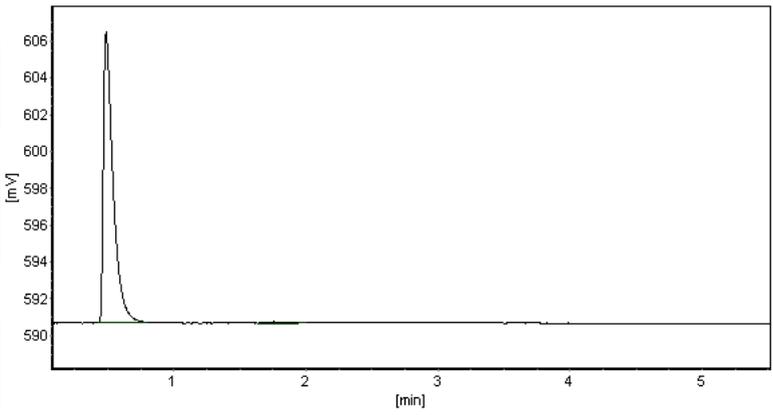
Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437

Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA

Inlet : CIP, Temp = 80 C

Coloumn : Porapak-Q

Oven : 43C (8 min)



General Result

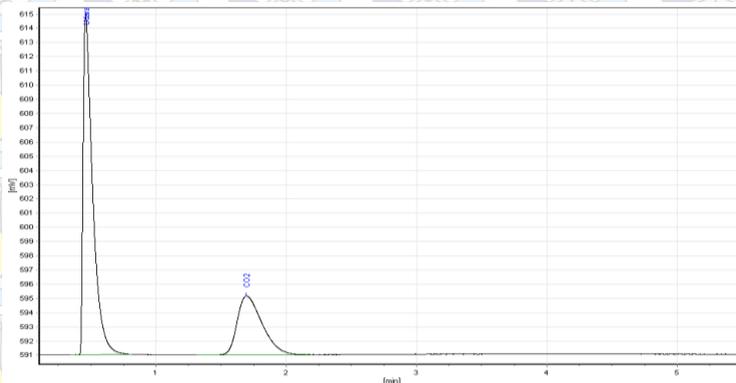
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.486	15750	80542	99.70922	BB
2	CO2	1.758	22	235	0.29078	BB
TOTAL			15772	80777	100	

SLG-2

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-2
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.465	23637	122638	67.55073	BB
2	CO2	1.723	4237	56363	32.44927	BB
TOTAL			27874	179001	100	

SGO-2

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-2

Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

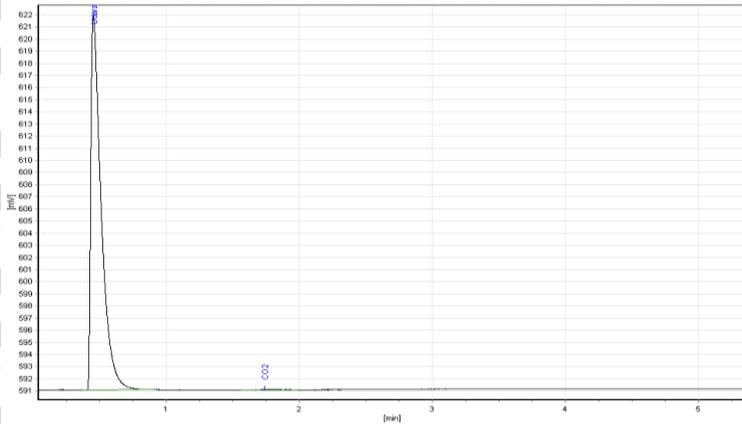
Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437

Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA

Inlet : CIP, Temp = 80 C

Coloumn : Porapak-Q

Oven : 43C (8 min)



General Result

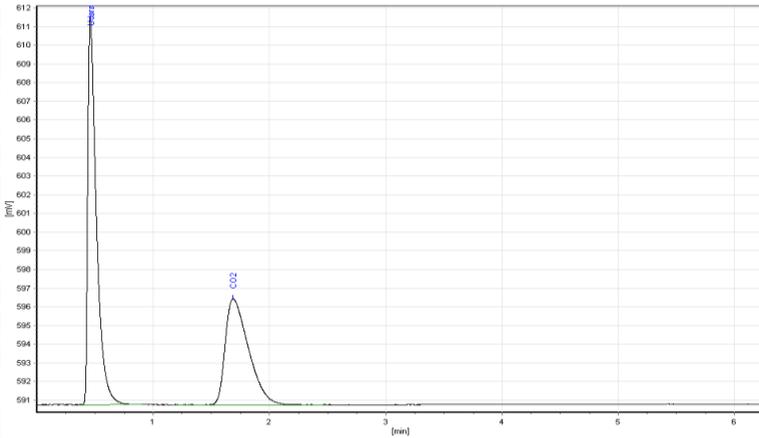
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.476	31022	174847	99.78315	BB
2	CO2	1.765	29	378	0.21685	BB
TOTAL			31051	175227	100	

SLG-3

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-3
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

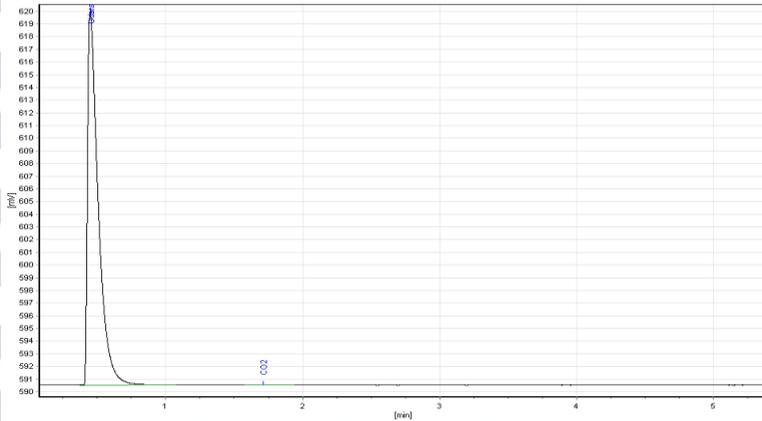
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.462	20769	107915	67.63353	BB
2	CO2	1.727	5334	69569	32.36647	BB
TOTAL			26103	177484	100	

SGO-3

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-3
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

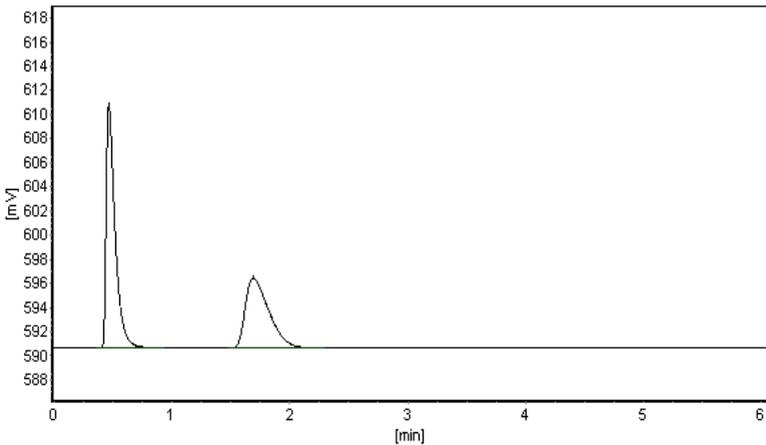
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.464	29720	172652	99,82315	BB
2	CO2	1.767	28	369	0.17685	BB
TOTAL			29748	173021	100	

SLG-4

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-4
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)

**General Result**

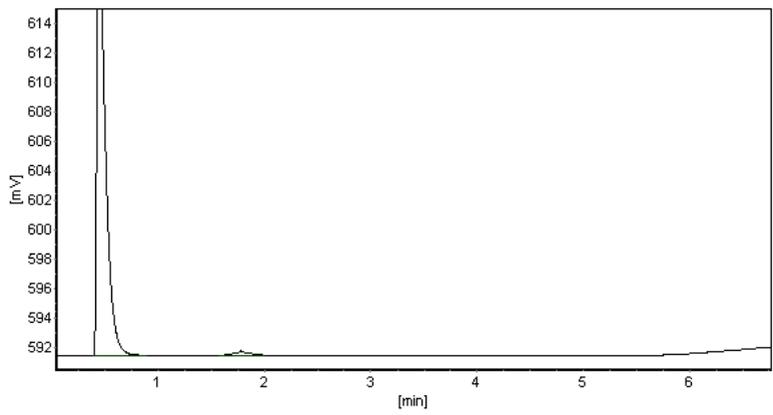
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.462	20261	109261	69.02363	BB
2	CO2	1.739	5388	67771	30.97637	BB
TOTAL			25649	177032	100	

SGO-4

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-4
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

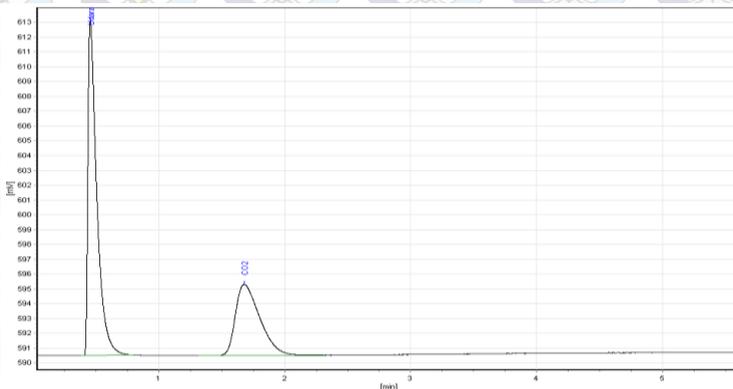
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.459	30388	173052	99.86746	BB
2	CO2	1.781	26	343	0.13254	BB
TOTAL			30414	173395	100	

SLG-5

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-5
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

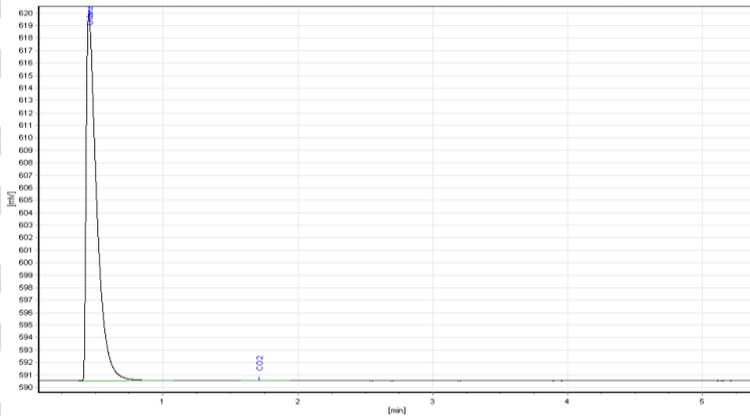
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.455	22599	111133	65.02669	BB
2	CO2	1.735	4756	64877	34.97331	BB
TOTAL			27355	176010	100	

SGO-5

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-5
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

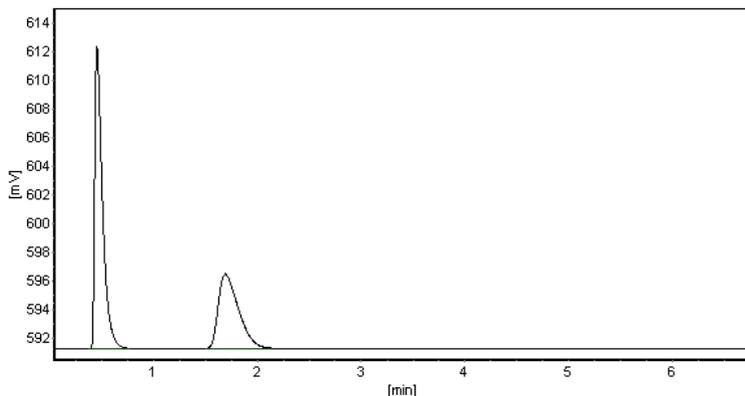
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.448	29449	160334	99.858	BB
2	CO2	1.773	21	228	0.142	BB
TOTAL			29470	160562	100	

SLG-6

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-6
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

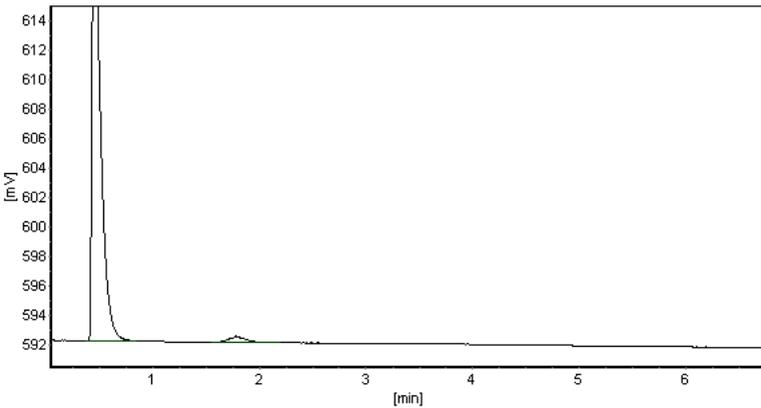
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.463	20672	111692	67.07041	BB
2	CO2	1.731	5539	69082	32.92959	BB
TOTAL			26211	180774	100	

SGO-6

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-6
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

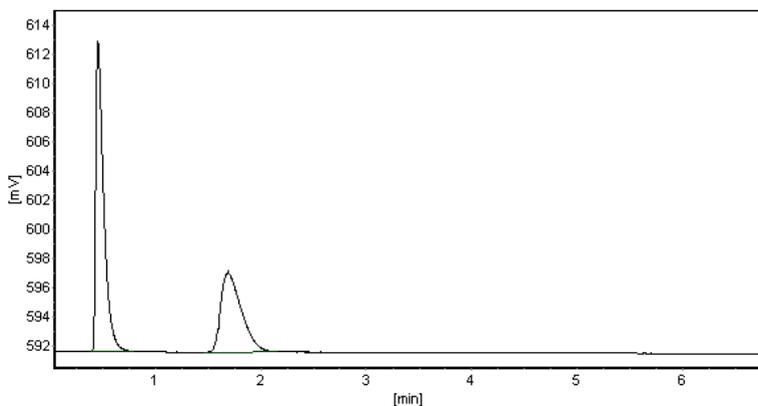
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.446	31208	174781	99.76544	BB
2	CO2	1.783	55	421	0.23456	BB
TOTAL			31263	175202	100	

SLG-7

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-7
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

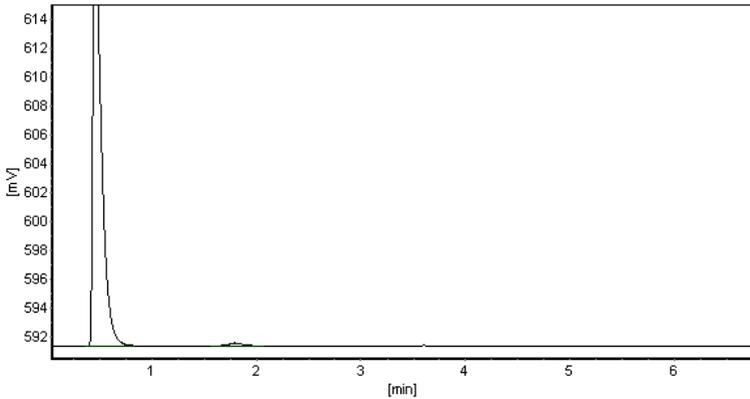
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.463	20388	10344	66.25221	BB
2	CO2	1.723	5842	68107	33.74779	BB
TOTAL			26230	171851	100	

SGO-7

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-7
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

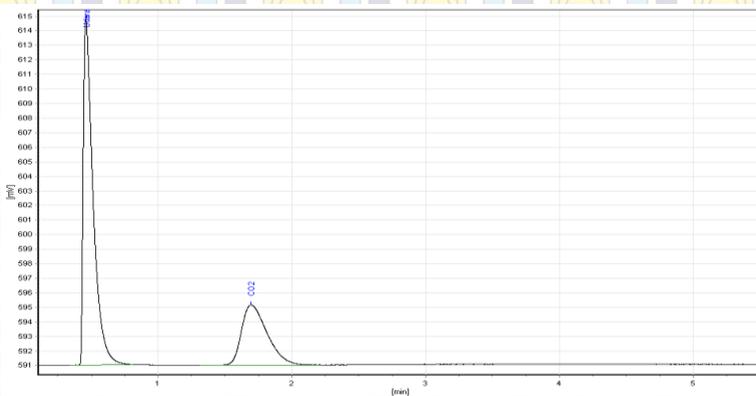
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.479	31038	173101	99.80326	BB
2	CO2	1.786	51	398	0.19674	BB
TOTAL			31089	173499	100	

SLG-8

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-8
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

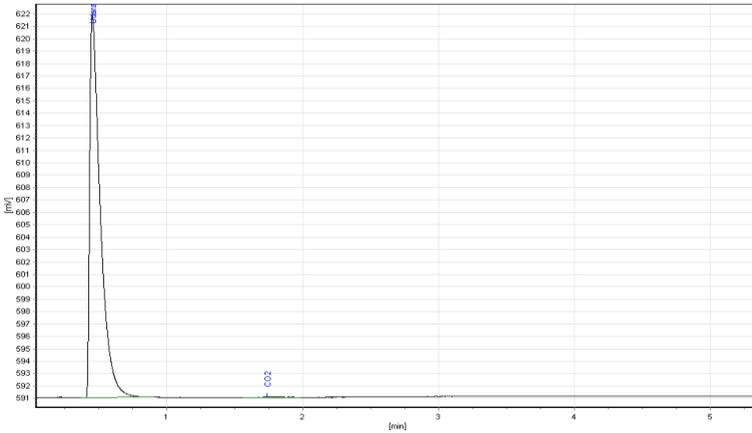
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.459	23794	121179	66.9428	BB
2	CO2	1.722	4179	54879	33.0572	BP
TOTAL			27973	176058	100	

SGO-8

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-8
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

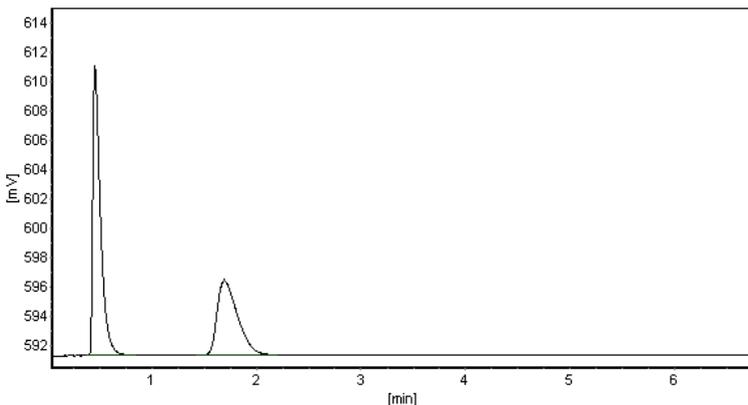
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.455	30757	167823	99.7664	BB
2	CO2	1.743	30	393	0.2336	BB
TOTAL			30787	168216	100	

SLG-9

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-9
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

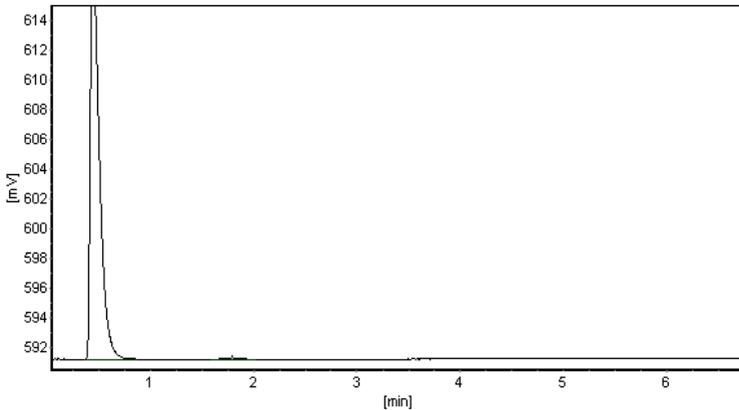
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.461	20510	102832	66.13633	BB
2	CO2	1.722	5164	67667	33.86367	BB
TOTAL			25674	170499	100	

SGO-9

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-9
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.449	30980	180445	99.82135	BB
2	CO2	1.786	27	370	0.17865	BB
TOTAL			31007	180815	100	

SLG-10

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-10

Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

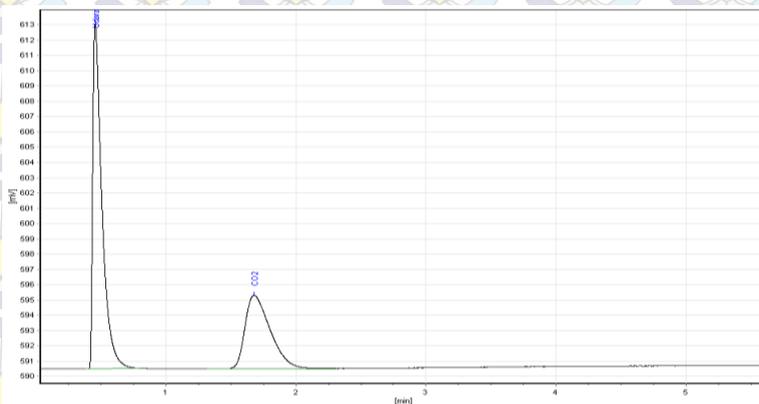
Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437

Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA

Inlet : CIP, Temp = 80 C

Coloumn : Porapak-Q

Oven : 43C (8 min)



General Result

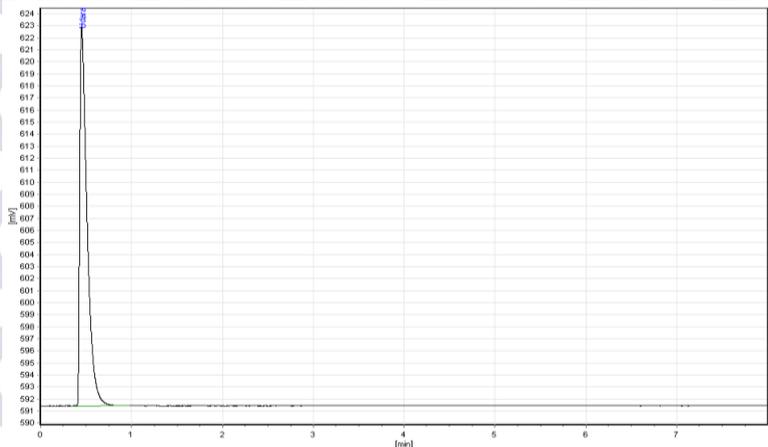
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.457	20321	104517	65.98545	BB
2	CO2	1.717	5225	69387	34.01455	BB
TOTAL			25646	173904	100	

SGO-10

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-10
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.451	31462	177037	99.84346	BB
2	CO2	1.791	26	340	0.15654	BB
TOTAL			31488	177377	100	

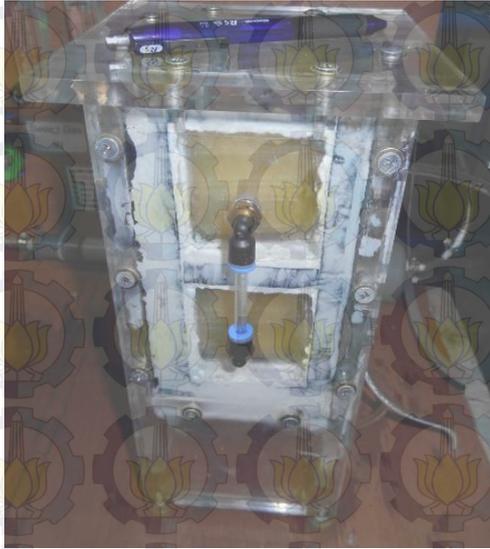
Tabel Hasil Analisa GC (lanjutan)

<i>Sales Gas (SLG)</i>		<i>Sweep Gas Out (SGO)</i>	
Kode	% CO₂ (% volume)	Kode	% CO₂ (% volume)
SLG-11	29,98941	SGO-11	0,1683
SLG-12	34,95348	SGO-12	0,15739
SLG-13	35,89399	SGO-13	0,15435
SLG-14	35,54916	SGO-14	0,13423
SLG-15	35,84467	SGO-15	0,16911
SLG-16	33,41179	SGO-16	0,27293
SLG-17	40,14196	SGO-17	1,56406
SLG-18	38,96085	SGO-18	0,3044
SLG-19	40,47607	SGO-19	0,43868
SLG-20	39,20707	SGO-20	0,18908
SLG-21	46,49061	SGO-21	0,28767
SLG-22	39,44375	SGO-22	0,42076
SLG-23	32,91002	SGO-23	0,17556
SLG-24	33,16702	SGO-24	2,16017
SLG-25	37,65752	SGO-25	0,39181
SLG-26	30,37	SGO-26	0,25
SLG-27	36,31	SGO-27	0,69
SLG-28	38,9	SGO-28	0,97
SLG-29	40,57	SGO-29	1,27
SLG-30	42,13	SGO-30	1,43
SLG-31	42,18	SGO-31	1,51
SLG-32	40,2	SGO-32	2,47
SLG-33	43,26	SGO-33	2,49



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN B



Gambar B.1 Modul Kontaktor Membran Menyilang Ganda



Gambar B.2 Instalasi Peralatan Percobaan Absorpsi-Desorpsi Simultan dengan Kontaktor Membran Menyilang Ganda



Gambar B.3 *Gas Chromatography (GC) Analyzer*



Gambar B.4 *Gas Syringe*



Gambar B.5 *Seperangkat Alat Uji SEM*





FINAL PROJECT - TK141581

**PERFORMANCE TEST OF DOUBLE CROSSED
MEMBRANE CONTACTOR FOR SIMULTANEOUS
ABSORPTION-DESORPTION OF CO₂ USING
DIETHANOLAMINE (DEA)**

Compiled by:

**Toto Iswanto
NRP. 2311100026**

**Muhammad Rifa'i
NRP. 2311100187**

Advisors:

**Advisor I
Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.
NIP. 1976 1020 2005 01 2001**

**Advisor II
Dr. Ir. Susianto, DEA
NIP. 1962 08 20 1989 03 1004**

**HEAT AND MASS TRANSFER LABORATORY
DEPARTEMENT OF CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2015**

LEMBAR PENGESAHAN

UJI KINERJA KONTAKTOR MEMBRAN MENYILANG GANDA UNTUK PROSES ABSORPSI-DESORPSI CO₂ SECARA SIMULTAN MENGGUNAKAN PELARUT DIETANOLAMINA (DEA)

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kimia
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

Toto Iswanto **NRP. 2311 100 026**
Muhammad Rifa'i **NRP. 2311 100 187**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. (Pembimbing 1)
2. Dr. Ir. Susianto, DEA (Pembimbing 2)
3. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S. (Penguji I)
4. Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D. (Penguji II)
5. Dr. Lailatul Qadariyah, S.T., M.T. (Penguji III)



**PERFORMANCE TEST OF DOUBLE CROSSED
MEMBRANE CONTACTOR FOR SIMULTANEOUS
ABSORPTION-DESORPTION OF CO₂ USING
DIETHANOLAMINE (DEA)**

Name : 1. Toto Iswanto (2311100026)
: 2. Muhammad Rifa'i (2311100187)
Department : Chemical Engineering ITS
Advisors : 1. Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.
: 2. Dr. Ir. Susianto, DEA

ABSTRACT

This study aimed to test the performance of polypropylene hollow fiber membrane contactor by combining absorption and desorption process simultaneously in a membrane contactor module using diethanolamine (DEA) as a solvent which was expected to separate CO₂ optimally by using of minimum solvents. In addition, this study also aimed to study the effect of operating parameters such as the concentration and flow rate of CO₂ as a feed gas, and the flow rate of N₂ as a sweep gas against the rate of mass transfer and CO₂ absorption and desorption efficiency simultaneously in the module.

The CO₂ separation method that used in this study was divided into two method, namely the absorption and desorption occurring in a membrane module. For the absorption process, the variable was the flow rate of feed gas (the gas mixture of CO₂ and N₂). Whereas, the variable of desorption process was the flow rate of pure N₂ gas as a sweep gas. In the contactor module system, the solvent was allowed to stand in the shell side of module, where the feed gas was supplied to the lumen of the first tube, and sweep gas flowed into the lumen of the second tube of membrane in module. After steady state was reached, the sales and sweep gas out were tested using Gas Chromatography (GC) analyzer to determine the CO₂ content in the gas sample.

From the experimental results, it could be concluded that the absorption flux was increased if the concentration of CO₂ gas and the flow rate of feed gas were increased, while the flow rate of sweep gas tended not to affect the absorption flux. The highest absorption flux reached $2,306 \times 10^{-3}$ mol/m².s. Desorption flux was increased if the concentration of CO₂ gas was increased, the flow rate of feed gas was decreased, and flow rate of sweep gas was increased. The highest desorption flux reached $4,536 \times 10^{-5}$ mol/m².s. Absorption efficiency was increased if the concentration of CO₂ gas was increased, the flow rate of feed gas was decreased, and flow rate of sweep gas was decreased. The highest absorption efficiency reached 83,747%. Desorption efficiency was decreased then increased when the feed gas flow rate was increased, and then dropped when the flow rate of sweep gas was increased, while the concentration of CO₂ tended not to affect the desorption efficiency. The highest desorption efficiency was 4,873%. Overall, the membrane contactor module was able to role the absorption and desorption process over three hours of performance test.

Keywords: *CO₂ separation, hollow fiber membrane, polypropylene, simultaneous absorption-desorption*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan Laporan Skripsi kami dengan judul:

“UJI KINERJA KONTAKTOR MEMBRAN MENYILANG GANDA UNTUK PROSES ABSORPSI-DESORPSI CO₂ SECARA SIMULTAN MENGGUNAKAN PELARUT DIETANOLAMINA (DEA)”

Skripsi ini merupakan salah satu syarat memperoleh gelar sarjana di Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya. Selama penyusunan skripsi, kami banyak sekali mendapat bimbingan, dorongan, dan bantuan dari banyak pihak. Untuk itu, kami ingin mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M. Eng, selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya.
2. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S., selaku Kepala Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa atas bimbingan dan saran yang telah diberikan
3. Ibu Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Ir. Susianto, DEA selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.
4. Bapak Setiyo Gunawan S.T., Ph.D, selaku Koordinator Tugas Akhir dan Skripsi Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya.
5. Bapak dan Ibu Dosen Pengajar serta seluruh karyawan Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya.
6. Orang tua serta saudara-saudara kami atas do'a, dukungan, bimbingan, perhatian, dan kasih sayang yang selalu tercurah selama ini.
7. Teman-teman di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa dan teman-teman angkatan K-51 atas dukungannya.

Kami menyadari bahwa materi yang kami sajikan masih banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kami sangat mengharapkan saran dan masukan yang konstruktif dari pembaca.

Surabaya, Juli 2015

Penyusun

DAFTAR ISI

LERMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
<i>ABSTRACT</i>	iv
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang Masalah	1
I.2 Rumusan Masalah.....	3
I.3 Batasan Masalah	4
I.4 Tujuan Penelitian	4
I.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 Karbondioksida (CO ₂).....	7
II.2 Kontaktor Membran Serat Berongga.....	8
II.3 Parameter Operasi pada Kontaktor Membran	12
II.4 Pemilihan Mode Aliran	15
II.5 Fenomena Pembasahan.....	16
II.6 Material Membran	18
II.7 Pemilihan Pelarut Alkanolamina	21
II.8 Posisi Penelitian (<i>State of Art</i>).....	23

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Garis Besar Penelitian 27

III.2 Bahan yang Digunakan 27

III.3 Variabel Penelitian 28

III.4 Rangkaian Alat Penelitian 29

III.5 Prosedur Penelitian 30

III.6 Prosedur Analisa Hasil Penelitian 32

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Uji Pengaruh Parameter Operasi 40

IV.2 Uji Kinerja 61

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan 67

V.2 Saran 68

DAFTAR PUSTAKA xvi

DAFTAR NOTASI xxii

APPENDIKS xxiv

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1	Proses Pemisahan CO ₂ Menggunakan Kontaktor Membran.....	9
Gambar II.2	Perpindahan Massa Komponen i (a) dari fasa gas ke fasa cairan (absorpsi); (b) dari fasa cairan ke fasa uap melalui pori membran (desorpsi).....	10
Gambar II.3	Pola Aliran pada Kontaktor Membran (a) aliran paralel; (b) aliran menyilang.....	16
Gambar II.4	Sudut Kontak dan Pembasahan Permukaan (a) tidak terbasahi, (b) menyebar; (c) menyebar	16
Gambar II.5	Struktur Politetrafluoroetilena (PTFE).....	19
Gambar II.6	Struktur Polipropilena (PP).....	20
Gambar II.7	Struktur Polivinildenefluorid (PVDF)	21
Gambar III.1	Modul Kontaktor Membran Tampak Samping	29
Gambar III.2	Penampang Modul Kontaktor Membran Tampak Atas.....	29
Gambar III.3	Rangkaian Peralatan Penelitian	30
Gambar III.4	Diagram Alir Percobaan Uji Pengaruh Parameter Operasi.....	31
Gambar III.5	Diagram Alir Percobaan Uji Kinerja	32
Gambar III.6	Ilustrasi 3 Dimensi Semua Titik Eksperimen pada Permukaan Bola dengan Metode <i>Central Composite Design</i>	36
Gambar IV.1	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Absorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% dengan Pendekatan Statistik.....	41

Gambar IV.2	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Absorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik.....	41
Gambar IV.3	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Absorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% Hasil Percobaan Eksperimental.....	42
Gambar IV.4	<i>Response Surface</i> Fluks Absorpsi.....	44
Gambar IV.5	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Desorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% dengan Pendekatan Statistik.....	45
Gambar IV.6	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Desorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik.....	45
Gambar IV.7	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Desorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% Hasil Percobaan Eksperimental.....	46
Gambar IV.8	<i>Response Surface</i> Fluks Desorpsi.....	48
Gambar IV.9	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% dengan Pendekatan Statistik.....	49
Gambar IV.10	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik.....	49

Gambar IV.11	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% Hasil Percobaan Eksperimeta.....	50
Gambar IV.12	<i>Response Surface</i> Efisiensi Absorpsi.....	51
Gambar IV.13	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Desorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% dengan Pendekatan Statistik.....	52
Gambar IV.14	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Desorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik	53
Gambar IV.15	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Desorpsi CO ₂ pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% Hasil Percobaan Eksperimeta.....	54
Gambar IV.16	<i>Response Surface</i> Efisiensi Desorpsi.....	55
Gambar IV.17	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO ₂ <i>Loading</i> pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% dengan Pendekatan Statistik.....	56
Gambar IV.18	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO ₂ <i>Loading</i> pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik.....	57
Gambar IV.19	Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO ₂ <i>Loading</i> pada Berbagai Laju <i>Alir Sweep Gas In</i> (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO ₂ 40% dari Percobaan Eksperimental	57
Gambar IV.20	<i>Response Surface</i> CO ₂ <i>Loading</i>	59

Gambar IV.21 Fluks Desorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO₂ 40%.....61

Gambar IV.22 Fluks Absorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO₂ 40%.....62

Gambar IV.23 Konsentrasi CO₂ dalam *Sales Gas* Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO₂ 40%.....63

Gambar IV.24 Efisiensi Absorpsi dan Desorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO₂ 40%.....64

Gambar IV.25 Hasil SEM Permukaan Membran PP (a) sebelum perendaman; (b) setelah perendaman.....65

Gambar IV.26 Pelarut yang Terbawa oleh Aliran Gas.....65

DAFTAR TABEL

Tabel II.1	Sifat Fisika Karbondioksida (CO ₂)	7
Tabel II.2	Temperatur Transisi Gelas (T_g) Polimer	19
Tabel II.3	Perbandingan Karakteristik Pelarut Alkanolamina	22
Tabel II.4	Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO ₂ Secara Simultan Menggunakan Kontaktor Membran	24
Tabel II.5	Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO ₂ Menggunakan Kontaktor Membran	26
Tabel III.1	Data Karakteristik Membran Polipropilena	28
Tabel III.2	Rentang Nilai Variabel Berubah untuk Percobaan Absorpsi-Desorpsi	28
Tabel III.3	Jumlah Tempuhan Penelitian Setelah Menggunakan DesignExpert®	35



DAFTAR NOTASI

Notasi	Keterangan	Satuan
J	Laju perpindahan massa	(mol/m ² .s)
η	Efisiensi pemisahan CO ₂	(%)
θ	Sudut kontak	(°)
ε	Porositas	-
γ	Tegangan permukaan	(N/m)



LAMPIRAN C RIWAYAT HIDUP

Toto Iswanto



Toto Iswanto lahir di Tasikmalaya, Jawa Barat pada tanggal 30 April 1992. Menempuh pendidikan formal di SD Negeri Cibalong 1 Tasikmalaya tahun 1999-2005, kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMP Negeri 1 Cibalong tahun 2005-2008 dan melanjutkan pendidikan SMA di SMA Negeri 1 Karangnunggal tahun 2008-2011. Setelah lulus dari pendidikan SMA, penulis melanjutkan ke tingkat sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya,

Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Kimia pada tahun 2011 dan terdaftar dengan NRP 2311100026. Di jurusan teknik kimia, penulis mengambil tugas akhir bidang perpindahan panas dan massa dengan spesialisasi teknologi aplikasi membran di bawah bimbingan Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. dan Dr. Ir. Susianto, DEA. Selama masa kuliah, penulis sempat menjadi Asisten Laboratorium Komputasi Numerik Terapan, Mikrobiologi Industri, dan Wawasan Teknologi dan Komunikasi Ilmiah (UPMB). Selain aktif dibidang akademis, penulis pernah menjadi Ketua LSM Himpunan Mahasiswa Bidikmisi ITS tahun 2012-2014 dan *Staff Research and Technology Department* Himatekk tahun 2012-2013. Penulis pernah mendapatkan kesempatan untuk kerja praktek di PT Pertamina RU-III, Plaju-Sungai Gerong, Palembang, Sumatera Selatan tahun 2014 dan menjadi delegasi ITS untuk studi banding ke universitas terbaik di Thailand pada tahun 2013.

Hormat saya,

Toto Iswanto
081232090787

totoiswanto.mt@gmail.com

Muhammad Rifa'i



Muhammad Rifa'i lahir di Metro, Lampung pada tanggal 10 April 1992. Menempuh pendidikan formal di SD Negeri 09 Kunungan-Parik Rantang, Sijunjung, Sumatera Barat tahun 1998-2004, kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMP Negeri 1 Metro tahun 2004-2007 dan melanjutkan pendidikan SMA di SMA Negeri 1 Metro tahun 2007-2010. Setelah lulus dari pendidikan SMA, penulis melanjutkan ke tingkat sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Kimia pada tahun 2011 dan terdaftar dengan NRP 2311100187. Di jurusan teknik kimia, penulis mengambil tugas akhir bidang perpindahan panas dan massa dengan spesialisasi teknologi aplikasi membran di bawah bimbingan Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. dan Dr. Ir. Susianto, DEA. Penulis pernah mendapatkan kesempatan untuk kerja praktek di PT Pertamina RU-III, Plaju-Sungai Gerong, Palembang, Sumatera Selatan tahun 2014.

Hormat saya,

Muhammad Rifa'i
085383009717
muhammad.rifai27@gmail.com

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang Masalah

Indonesia merupakan salah satu negara dengan cadangan gas alam cukup besar. Namun, gas alam tersebut tidak hanya mengandung komponen hidrokarbon, tetapi juga beberapa gas pengotor seperti uap air, N_2 , CO_2 , H_2S , dengan kadar CO_2 dan uap air relatif lebih besar dibandingkan N_2 dan H_2S sehingga diperlukan proses pengolahan gas sebelum dapat dimanfaatkan lebih lanjut.

Pada proses pengolahan gas alam, proses pemisahan karbondioksida (CO_2) menjadi bagian yang sangat penting karena CO_2 di dalam gas alam berperan sebagai pengotor yang bersifat korosif. Jika di dalam gas alam terkandung uap air maka dapat mengasamkan CO_2 menjadi H_2CO_3 . Sifat korosif tersebut sangat merugikan karena menyebabkan penurunan temperatur dan tekanan pada bagian perpipaan, pendingin, dan injektor turbin. Sebagai contoh di dalam turbin gas, CO_2 akan mengakibatkan terjadinya penurunan nilai panas (*heating value*) dan berkurangnya tegangan listrik yang dihasilkan oleh turbin gas tersebut (Tolage, 2009). Dalam proses pengolahan LNG (*Liquefied Natural Gas*), CO_2 harus dihilangkan agar tidak terjadi pembekuan (*icing*) pada saat proses pencairan gas alam (Kartohardjono dkk., 2007) karena proses tersebut berjalan pada suhu yang sangat rendah, yaitu $-161^\circ C$, sedangkan titik beku CO_2 sekitar $-78,4^\circ C$ (Perry & Green, 2008).

Berbagai teknologi telah digunakan dalam proses pemisahan CO_2 dari gas alam, salah satunya dengan kontaktor membran. Kontraktor membran merupakan alternatif pemisahan CO_2 dengan potensi yang menguntungkan dari sisi ekonomi dan efektifitas operasional. Peralatan ini memiliki ukuran 10 kali lebih kecil dari pada *pack tower* (Gabelman & Hwang, 1999), memiliki luas area kontak 4-30 kali lebih besar dibanding luas area kontak kolom konvensional (Simioni dkk., 2011), dan konsumsi energi yang

lebih rendah dibandingkan kolom pemisah konvensional atau hibrid (perpaduan teknologi membran dan kolom pemisah konvensional). Namun, pada umumnya kontaktor membran yang ada sekarang masih menggunakan proses absorpsi-desorpsi CO₂ dengan peralatan terpisah sehingga memerlukan sirkulasi pelarut yang cukup besar, sehingga apabila menggunakan pelarut yang mahal akan meningkatkan total biaya operasional.

Penelitian teknologi kontaktor membran menyilang dengan memanfaatkan proses absorpsi dan desorpsi secara simultan dalam satu modul membran masih jarang ditemukan dalam pustaka jika dibandingkan dengan penelitian yang memanfaatkan proses absorpsi dan desorpsi secara terpisah. Terdapat beberapa penelitian tentang teknologi kontaktor membran untuk proses pemisahan CO₂, hanya saja masih terdapat beberapa kekurangan.

Salah satu penelitian tersebut adalah yang dilakukan oleh Kumazawa (2000) dan Shimada dkk. (2006) yang mengembangkan proses absorpsi-desorpsi CO₂ (5-20% berat) secara simultan dalam satu unit menggunakan kontaktor membran serat berongga polipropilena dengan pelarut *Adenosine Mono Phosphate* (AMP) dan metil aminoetanol (MAE). Percobaan dilakukan dalam satu tangki besar yang berisi banyak pelarut dengan kecepatan pengadukan tertentu untuk homogenitas pelarut, diperoleh hasil bahwa selama 22 hari proses absorpsi-desorpsi dapat berlangsung stabil. Sayangnya, peralatan penelitian tersebut tidak efisien karena selain memerlukan tangki yang besar, diperlukan pula larutan dalam jumlah banyak untuk menggantikan larutan yang telah jenuh oleh gas. Pada tahun 2014, Rahmawati melakukan penelitian mengenai absorpsi dan desorpsi CO₂ (30% berat) secara simultan dalam satu modul membran serat berongga polipropilena menyilang ganda berbentuk balok persegi dengan ukuran yang lebih kecil dari penelitian sebelumnya, yakni 20cm x 10cm x 10cm, dan tekanan operasi dibuat vakum menggunakan pompa vakum. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa efisiensi absorpsi dapat mencapai 46% dan efisiensi desorpsi 45%. Namun, pada penelitian ini terdapat kekurangan, yaitu penggunaan pompa

vakum menyebabkan suhu operasi tidak dapat berjalan konstan karena panas yang ditransfer pompa vakum pada sistem membran kontaktor akibat operasi dalam waktu yang lama.

Pada penelitian-penelitian di atas, variabel yang dipakai masih menggunakan aliran gas CO₂ dengan konsentrasi kecil, yakni 5-30% volume, sedangkan pada kenyataannya kandungan gas CO₂ pada gas alam ada yang mencapai 60% volume. Selain itu, pelarut yang digunakan (AMP, MAE, dan air) termasuk pelarut yang sekarang sudah tidak umum dipakai di industri dan selektivitas penyerapannya terhadap CO₂ pun kurang optimal dibandingkan menggunakan dietanolamina (DEA). Oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai kontaktor membran polipropilena (PP) menyilang ganda untuk proses adsorpsi-desorpsi secara simultan dengan konsentrasi CO₂ yang tinggi menggunakan pelarut dietanolamina (DEA) dan kondisi tekanan operasi atmosferik.

Membran PP akan disusun berlapis dan menyilang, dimana lapisan tersebut digunakan untuk menciptakan konfigurasi proses absorpsi dan desorpsi secara berselang-seling. Kondisi konfigurasi proses tersebut diharapkan bisa memisahkan CO₂ secara optimal dengan pemakaian jumlah pelarut yang minimal.

I.2 Rumusan Masalah

Penelitian mengenai kontaktor membran menggunakan proses absorpsi-desorpsi CO₂ lebih banyak dilakukan secara terpisah/hibrid, dimana pada proses absorpsi-desorpsi dengan peralatan terpisah memerlukan sirkulasi pelarut yang cukup besar sehingga apabila menggunakan pelarut yang mahal akan meningkatkan biaya operasional keseluruhan. Oleh karena itu dikembangkan kontaktor membran untuk proses absorpsi-desorpsi CO₂ secara simultan menggunakan satu modul kontaktor membran menyilang ganda.

Penelitian pada kontaktor membran menyilang untuk proses absorpsi-desorpsi CO₂ secara simultan pernah dilakukan oleh Kumazawa (2000), Shimada dkk. (2006), dan Rahmawati (2014).

Namun, penelitian tersebut masih menggunakan konsentrasi gas CO₂ yang kecil, yakni 5-30% volume, sedangkan kandungan gas CO₂ pada gas alam ada yang mencapai 30-60% volume.

Untuk mengetahui performa kerja dari modul kontaktor membran dengan untuk proses absorpsi-desorpsi secara simultan dalam satu modul membran serat berongga polipropilena menggunakan pelarut dietanolamina (DEA) dengan konsentrasi CO₂ sebagai gas umpan yang tinggi, maka dilakukan uji kinerja modul tersebut dengan terlebih dahulu mempelajari pengaruh parameter operasi seperti konsentrasi CO₂, laju alir gas CO₂ (gas umpan), dan laju alir gas N₂ (*sweep gas*) terhadap laju perpindahan massa dan efisiensi pemisahan CO₂ sehingga diketahui parameter operasi yang optimal untuk digunakan sebagai parameter operasi uji kinerja modul kontaktor membran secara kontinyu selama 8 jam.

I.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Membran kontaktor di dalam modul membran yang disusun menyilang ganda terbuat dari membran polipropilena (PP).
2. Pelarut yang digunakan untuk proses absorpsi CO₂ adalah dietanolamina (DEA) yang dioperasikan secara diam/*batch*, sedangkan untuk proses desorpsi CO₂ menggunakan N₂ sebagai *sweep gas*.
3. Laju alir dan konsentrasi gas CO₂ masuk diatur sesuai variabel penelitian.

I.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini yaitu untuk:

1. Mempelajari pengaruh parameter operasi seperti konsentrasi CO₂, laju alir gas CO₂ (gas umpan), dan laju alir gas N₂ (*sweep gas*) terhadap laju perpindahan massa dan efisiensi pemisahan CO₂ dalam modul kontaktor membran menyilang ganda dengan konsentrasi gas CO₂ yang tinggi.

2. Melakukan uji kinerja modul kontaktor membran secara kontinyu selama 8 jam untuk mengetahui besar fluks absorpsi dan desorpsi CO₂ serta efisiensi pemisahannya.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat diantaranya:

1. Memberikan inovasi baru berupa konfigurasi susunan membran, yaitu konfigurasi menyilang ganda, dimana membran polipropilena untuk proses absorpsi dan desorpsi masing-masing disusun secara menyilang dan berlapis (berganda). Konfigurasi seperti ini mampu mempercepat regenerasi pelarut (DEA) yang digunakan untuk mengabsorpsi CO₂ dari gas alam karena CO₂ yang baru terabsorpsi dari membran aliran gas umpan oleh pelarut dapat langsung didesorpsi oleh *sweep gas* ke dalam membran aliran *sweep gas* sehingga kontaktor membran tersebut mampu memisahkan CO₂ secara optimal dengan pemakaian jumlah pelarut yang minimal.
2. Penelitian tentang uji kontaktor membran yang disusun secara menyilang ganda menggunakan pelarut DEA dengan meninjau parameter operasinya belum pernah ada. Dengan demikian, penelitian ini dapat memberikan data-data parameter operasi pada beberapa kondisi laju alir gas umpan dan *sweep gas* masuk serta konsentrasi gas umpan dalam modul kontaktor membran polipropilena menyilang ganda secara simultan sehingga dapat dijadikan referensi atau rujukan dalam pengaplikasian kontaktor membran menyilang ganda skala industri.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Karbondioksida (CO₂)

Karbon dioksida (CO₂) adalah gas tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak mudah terbakar. Karbondioksida juga senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon. Karbondioksida tidak berbentuk cair pada tekanan di bawah 5,1 atm, namun langsung menjadi padat pada temperatur di bawah -78°C.

Tabel II.1 Sifat Fisika Karbondioksida (CO₂)

Sifat	Nilai
Titik didih	-57,5°C
Titik beku normal	-78,4°C
Temperatur kritis	38°C
Tekanan kritis	0,6 kg/cm ² .g
Panas peleburan	1.900 cal/mol
Panas penguapan	6.030 cal/mol

(Sumber: Perry & Green, 2008)

Karbondioksida merupakan gas yang bersifat asam dan jika bereaksi dengan air dapat membentuk senyawa yang bersifat asam kuat, yaitu asam karbonat (H₂CO₃) yang dapat menyebabkan korosi pada sistem perpipaan dan peralatan proses. Dalam proses pencairan gas alam menjadi LNG, terdapat kontaminan berupa gas-gas pengotor yang harus dihilangkan agar tidak terjadi pembekuan pada temperatur yang sangat rendah. Hal ini karena proses pencairan gas alam berjalan pada suhu -161°C yang akan menyebabkan CO₂ membeku (-78,4°C) dan mengganggu proses tersebut (Kartohardjono dkk., 2007). Permasalahan pada gas alam yang paling utama adalah adanya kandungan CO₂ dan H₂S yang cukup besar, yaitu dengan kandungan CO₂ sebesar 21,576% mol dari keseluruhan komposisi gas alam.

II.2 Kontaktor Membran Serat Berongga

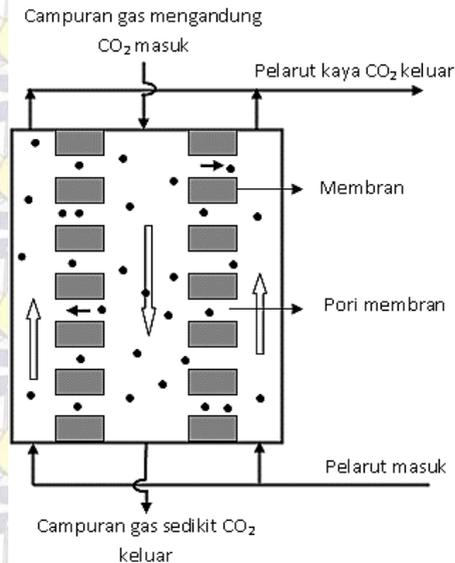
Berbagai teknologi telah digunakan dalam proses pemisahan CO₂ dari gas alam seperti absorpsi, adsorpsi, kriogenik, dan teknologi membran. Untuk adsorpsi, penyerapan CO₂ belum begitu efisien dan regenerasi pelarut yang sulit. Kriogenik membutuhkan instalasi dan operasi yang besar. Untuk absorpsi, pada kolom konvensional terdapat banyak kelemahan yaitu terjadinya *entrainment*, *flooding*, *loading*, dan *foaming*, membutuhkan energi yang besar, serta instalasinya besar (Cooney, 1989). Sedangkan untuk teknologi membran, penurunan tekanan yang terjadi besar dan selektivitasnya buruk sehingga menyebabkan terdapat hidrokarbon yang lolos bersama dengan CO₂. Oleh karena itu digunakan teknologi kontaktor membran yang diharapkan dapat menganggulangi masalah di atas.

Membran *hollow fiber* dapat diartikan sebagai membran kapiler yang terdiri dari bagian *tube* dan *shell*, persis seperti *heat exchanger*. Absorben mengalir di dalam *tube* sedangkan aliran gas mengalir di bagian *shell* atau bisa juga sebaliknya. Kelebihan teknologi ini dibanding teknologi absorpsi gas-cairan konvensional adalah terpisahnya aliran gas dan cairan sehingga pengaturan pola aliran dapat bersifat fleksibel untuk menghindari kemungkinan *flooding*, *loading*, dan *entrainment* yang umum terjadi pada teknologi konvensional (Gabelman dan Hwang, 1999). Luas permukaan kontak gas-cairan untuk kolom unggun tetap (*packed column*) mendekati 30-300 m²/m³ sedangkan kontaktor membran bisa mencapai 1.600-6.600 m²/m³ (Mulder, 1996).

Kontaktor membran dapat mengakomodasi perpindahan massa gas-cair tanpa adanya dispersi satu fasa ke fasa lainnya. Perpindahan antar fasa pada kontraktor membran didorong oleh adanya beda konsentrasi komponen antara fasa dan penurunan tekanan yang diperlukan untuk menahan interfasa antarfluida sangat kecil.

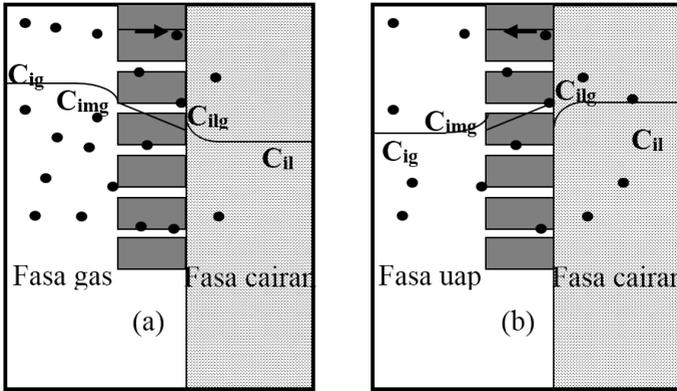
Teknologi kontaktor membran untuk pemisahan CO₂ merupakan pengembangan membran poros hidrofobik sebagai media pembatas yang membantu kontak dua fluida untuk tujuan

perpindahan massa tanpa terjadi dispersi dari satu fasa ke fasa lainnya. Kelebihan teknologi ini dibanding teknologi absorpsi konvensional adalah luas permukaan per volume tinggi sehingga kemungkinan untuk terjadinya perpindahan massa lebih besar (Rahmawati, 2014). Proses pemisahan CO₂ menggunakan kontaktor membran disajikan pada **Gambar II.1**.



Gambar II.1 Proses Pemisahan CO₂ Menggunakan Kontaktor Membran

Proses perpindahan massa suatu komponen dari fasa gas ke dalam fasa cairan melewati pori membran terdiri dari tiga tahap, yaitu perpindahan komponen terlarut dalam fasa badan gas ke permukaan membran, perpindahan gas melewati pori membran ke permukaan cairan, dan perpindahan gas dari permukaan cairan ke fasa badan cairan (Mansourizadeh, 2011). Peristiwa perpindahan massa ini berlaku sebaliknya untuk proses desorpsi seperti disajikan pada **Gambar II.2**.



Gambar II.2 Perpindahan Massa Komponen i (a) dari fasa gas ke fasa cairan (absorpsi); (b) dari fasa cairan ke fasa uap melalui pori membran (desorpsi).

Gambar di atas menjelaskan fluks pada keadaan tunak dari komponen i melalui lapisan gas sama dengan fluks melalui membran, dan sama dengan fluks melalui lapisan cairan yang didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut.

$$J_i = k_{ig} (C_{ig} - C_{img}) = k_{im} (C_{img} - C_{i lg}) = k_{il} (C_{i lg} - C_{il}) \quad (\text{II.1})$$

dimana:

k_{ig} = koefisien perpindahan massa dalam fasa gas komponen i (dm/s)

k_{im} = koefisien perpindahan massa dalam membrankomponen i (dm/s)

k_{il} = koefisien perpindahan massa dalam fasa cairan komponen i (dm/s)

C_{ig} = konsentrasi komponen i dalam fasa gas (mol/L)

C_{img} = konsentrasi komponen i pada antarfasa gas-membran (mol/L)

C_{ilg} = konsentrasi komponen i pada antarfasa gas-cairan (mol/L)

C_{il} = konsentrasi komponen i dalam fasa cairan (mol/L)

Untuk proses desorpsi, perpindahan massa komponen i terjadi dari fasa cairan ke fasa uap dapat menggunakan persamaan yang sama dengan merubah tanda dalam masing-masing fluks.

Koefisien perpindahan massa keseluruhan tergantung pada koefisien perpindahan massa individu, yaitu di bagian fasa gas ($1/k_{ig}$), membran ($1/k_{im}$), dan fasa cairan ($1/k_{il}$) dengan persamaan teoritis hambatan seri sebagai berikut (Kreulen dkk., 1993b).

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{k_{il}E} + \frac{1}{k_{im}H} + \frac{1}{k_{ig}H} \quad (\text{II.2})$$

Ketika menggunakan membran *hollow fiber* dengan cairan di bagian *shell* dan gas mengalir di sisi lumen, dengan daerah antarfasa gas-cairan berada pada diameter luar lumen (*nonwetted mode*), maka persamaan (II.2) adalah sebagai berikut:

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{k_{il}E} + \frac{d_o}{k_{im}Hd_{im}} + \frac{d_o}{k_{ig}Hd_i} \quad (\text{II.3})$$

H adalah konstanta hukum Henry tak berdimensi yang merupakan perbandingan konsentrasi gas pada keadaan setimbang terhadap konsentrasi pelarut (Qi & Cussler, 1985), E adalah faktor hambatan yang merupakan perbandingan dari fluks absorpsi dengan adanya reaksi kimia terhadap fluks absorpsi dengan tidak ada reaksi kimia (Khaisri dkk., 2010), d_i , d_o , dan d_{im} adalah berturut-turut diameter dalam, diameter luar dari *fiber*, dan diameter rata-rata di bagian membran ($d_o-d_i/\ln(d_o/d_i)$). Persamaan koefisien perpindahan massa di atas menggunakan asumsi ukuran pori dan karakteristik pembasahan membran seragam.

Pada proses absorpsi, hambatan perpindahan massa untuk difusi gas dari badan gas ke permukaan luar membran dapat diabaikan dibanding hambatan lainnya (Karror dkk., 1993, Rangwala, 1996, Dindore dkk., 2004). Dalam kasus absorpsi gas secara fisik sebagai contoh absorpsi CO_2 menggunakan air, hambatan perpindahan massa dihubungkan dengan fasa cairan yang bergantung pada hidrodinamika percobaan dan memerlukan laju alir cairan tetap (Mansourizadeh & Ismail, 2009).

II.3 Parameter Operasi pada Kontaktor Membran

Dalam pengoperasian kontaktor membran untuk pemisahan CO_2 , ada beberapa variabel operasi yang dapat mempengaruhi proses pemisahan antara lain:

1. Laju alir cairan

Hasil Kim & Yang (2000) menunjukkan bahwa peningkatan koefisien perpindahan massa pada kontaktor membran berbanding lurus dengan laju alir pelarut karena beda konsentrasi pada sisi gas dan cairan semakin tinggi sehingga jumlah CO_2 yang diserap semakin besar. Kosaraju dkk. (2005) mendapatkan hasil sedikit berbeda, yaitu peningkatan laju alir cairan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap koefisien perpindahan massa. Nii dkk. (1995) menyatakan bahwa pada konsentrasi NaOH yang tinggi (1 M), laju alir cairan tidak memberikan pengaruh terhadap koefisien perpindahan massa keseluruhan, sedangkan pada konsentrasi NaOH yang rendah, peningkatan laju alir cairan akan meningkatkan koefisien perpindahan massa. Selain itu, pada laju reaksi yang tinggi, konsentrasi CO_2 di bagian cairan keluar lebih tinggi jika laju alir cairan lebih rendah, sehingga konsentrasi CO_2 akan menurun dengan meningkatnya laju alir pelarut (Kim & Yang, 2000).

2. Konsentrasi pelarut

Kim & Yang (2000), Kumar dkk. (2002) melakukan penelitian bahwa pemisahan CO_2 semakin meningkat

dengan meningkatnya konsentrasi pelarut dan dengan jangka waktu tertentu, pelarut menjadi jenuh sehingga kemampuan menyerap CO₂ berkurang. Kinerja pemisahan ditunjukkan sebagai persen pemisahan CO₂, dimana persen pemisahan CO₂ akan optimal (mendekati 100%) pada konsentrasi pelarut tertentu.

3. Laju alir gas

Penelitian Wang dkk. (2006) menunjukkan bahwa laju alir gas berpengaruh terhadap laju absorpsi CO₂. Laju alir gas yang tinggi menyebabkan jumlah CO₂ yang diabsorpsi semakin meningkat.

4. Tekanan parsial CO₂

Kinerja perpindahan massa ditunjukkan sebagai fluks CO₂ melalui fiber membran. Feron dan Jansen (1995) melaporkan bahwa pada temperatur ruang, fluks merupakan fungsi rata-rata logaritmik tekanan parsial CO₂. Pada tekanan parsial CO₂ yang rendah, fluks CO₂ meningkat hampir linear dengan meningkatnya tekanan parsial CO₂. Sedangkan Kumar dkk. (2002) memperoleh hasil yang sedikit berbeda dimana tekanan parsial CO₂ mempunyai pengaruh linear terhadap fluks CO₂.

5. Tekanan campuran gas

Tekanan gas bisa dimanfaatkan untuk mengatasi permasalahan pembasahan pori membran oleh cairan. Penurunan fluks dan koefisien perpindahan massa terjadi karena adanya hambatan perpindahan massa fiber meningkat akibat pembasahan membran. Jika tekanan gas ditingkatkan, maka cairan yg memasuki pori fiber membran akan didorong balik ke dalam lumen membran (Wang dkk., 2006). Hedayat dkk. (2011) melaporkan bahwa setelah operasi absorpsi selama 14 hari, efisiensi absorpsi dapat meningkat kembali dengan menaikkan tekanan gas. Namun, kenaikan tekanan gas dibatasi oleh tekanan kritis gelembung (*bubbling*) (ΔP_b). Jika tekanan gas dinaikkan melebihi ΔP_b , maka akan terjadi gelembung di sisi cairan.

6. Tekanan operasi

Dindore dkk. (2004) melakukan percobaan pemisahan CO₂ menggunakan kontaktor membran hingga tekanan 20 bar, diperoleh hasil bahwa fluks akan meningkat dengan meningkatnya tekanan operasi. Namun, tekanan operasi tidak berpengaruh terhadap koefisien perpindahan massa total tetapi hanya menurunkan koefisien perpindahan massa pada fiber membran. Pada absorpsi fisik, hambatan perpindahan massa sisi cairan memiliki pengaruh yang paling dominan sehingga hambatan perpindahan massa fiber membran dapat diabaikan dan tidak mempengaruhi koefisien perpindahan massa total. Sedangkan untuk kasus dengan reaksi kimia, hambatan perpindahan massa fiber membran tidak bisa diabaikan karena hambatan sisi cairan lebih rendah dengan adanya faktor hambatan (*enhancement factor*).

7. Temperatur

Temperatur absorpsi memberikan pengaruh terhadap kinerja perpindahan massa. Pada temperatur yang tinggi, laju reaksi dan laju difusi lebih tinggi sehingga dapat meningkatkan koefisien perpindahan massa (Feron dkk., 2002). Khaisri dkk. (2011) melaporkan bahwa laju perpindahan massa pada proses desorpsi CO₂ dari pelarut MEA mengalami peningkatan seiring dengan naiknya temperatur. Untuk absorpsi menggunakan pelarut air, pengaruh temperatur justru berlaku sebaliknya, karena dengan kenaikan temperatur menyebabkan uap air mengisi pori membran sehingga difusi gas ke dalam cairan menjadi menurun dan hambatan perpindahan massa fiber membran meningkat (Wang dkk., 2000).

8. Penempatan Fluida

Modul kontaktor membran *hollow fiber* menyerupai alat perpindahan panas yang terdiri atas *shell* dan *tube*, dimana yang berfungsi sebagai *tube* adalah membran *hollow fiber* itu sendiri. Fluida dialirkan di bagian lumen dan bagian

shell dari membran. Untuk kontaktor membran gas-cairan, cairan lebih baik mengalir di dalam lumen dan gas mengalir di sisi *shell* (deMontigny dkk., 2006).

II.4 Pemilihan Mode Aliran

Modul kontaktor membran *hollow fiber* bisa dioperasikan dalam dua mode aliran, yaitu mode aliran paralel dan mode aliran menyilang. Dalam penelitian ini akan digunakan mode aliran menyilang dengan alasan pemilihan mode aliran yang dipakai sebagai berikut.

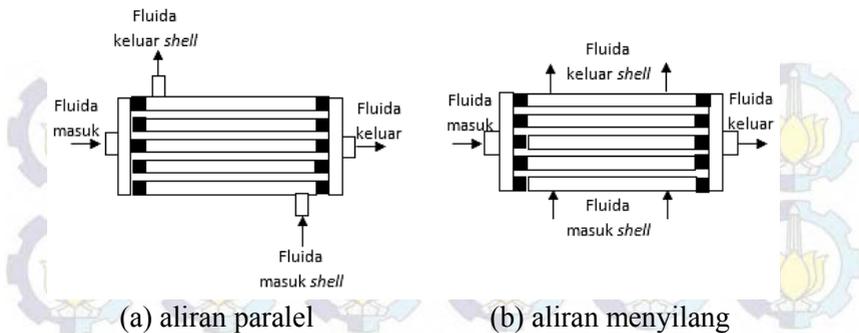
1. Mode aliran paralel

Pada aliran paralel kedua fasa fluida mengalir sejajar dengan *fiber* yang terbagi menjadi aliran searah (*co-current*) atau aliran berlawanan (*counter-current*). Pada aliran berlawanan, gaya dorong yang lebih besar sehingga lebih dipilih pada kondisi dimana tahanan perpindahan massa sisi membran dikontrol (Wang & Cussler, 1993). Selain itu, variasi tekanan transmembran (TMP) relatif tinggi sehingga menyebabkan terjadinya perpindahan dari satu fasa ke fasa lainnya. Pada aliran paralel, koefisien perpindahan massa total dapat menurun jika hambatan perpindahan massa sisi *shell* besar.

2. Mode aliran menyilang (*cross flow module*)

Aliran menyilang adalah aliran fluida di bagian *shell* tegak lurus dengan fiber. Aliran ini lebih atraktif karena dapat merusak lapisan pembatas (*boundary layer*) akibat pemisahan dan pencampuran kontinyu fluida yang mengalir tegak lurus sehingga koefisien perpindahan massa sisi *shell* lebih besar (Gabelman & Hwang, 1999).

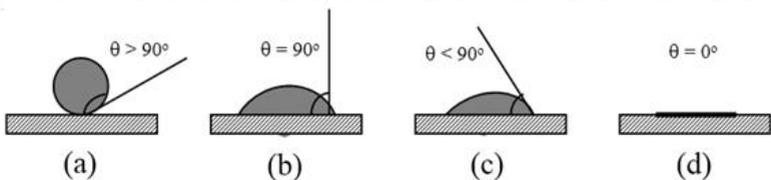
Untuk pola aliran fluida paralel dan menyilang pada kontaktor membran disajikan dalam Gambar II.3.



(a) aliran paralel (b) aliran menyilang
Gambar II.3 Pola Aliran pada Kontaktor Membran

II.5 Fenomena Pembasahan

Fenomena pembasahan terjadi karena adanya pelarut mengisi pori membran. Kecenderungan pembasahan fiber membran disebabkan oleh ukuran pori membran, tegangan permukaan pelarut, dan sudut kontak yang merupakan interaksi antara pelarut dan membran. Ketika tetesan cairan berkontak dengan permukaan fiber membran, bentuk akhir tetesan pada permukaan bergantung pada gaya molekular cairan (kohesi) dan antara cairan dan permukaan (adhesi). Pembasahan fiber membran dapat diprediksi dari sudut kontak yang dibuat oleh tetesan cairan dan permukaan fiber membran seperti disajikan dalam **Gambar II.4**.



Gambar II.4 Sudut Kontak dan Pembasahan Permukaan
 (a) tidak terbasahi; (b) menyebar; (c) menyebar; (d) terbasahi

Permukaan membran terbasahi sempurna ketika sudut kontak adalah nol. Sedangkan pada sudut kontak antara 0° hingga 90° menghasilkan penyebaran tetesan cairan karena adanya gaya molekular di permukaan dan membasahi pori membran. Untuk sudut kontak lebih besar dari 90° , cairan cenderung untuk menjauh dari permukaan membran sehingga tidak membasahi permukaan.

Pori membran hidrofobik yang memiliki energi permukaan rendah seperti politetrafluoroetilena (PTFE) dan polipropilena (PP) akan lebih sulit ditembus pelarut sampai tekanan minimum cairan masuk pori membran (*breakthrough pressure*). Tekanan minimum cairan ini merupakan korelasi antara tegangan permukaan pelarut, sudut kontak pelarut, fiber membran, serta ukuran pori membran. Hubungan ini ditunjukkan dengan persamaan Laplace-Young sebagai berikut:

$$\Delta P = -\frac{2\gamma_L \cos \theta}{r_{maks}} \quad (II.4)$$

dengan ΔP adalah tekanan minimum cairan masuk pori membran (kPa), γ_L adalah tegangan permukaan pelarut, θ adalah sudut kontak antara pelarut dan membran, dan r_{maks} adalah ukuran pori membran maksimum.

Dari persamaan (II.4) dapat disimpulkan bahwa tekanan minimum cairan dapat meningkat dengan (1) menggunakan fiber membran yang memiliki ukuran pori lebih kecil; (2) meningkatkan sudut kontak antara pelarut dan membran, dan (3) meningkatkan tegangan permukaan pelarut. Kumar dkk. (2002) melakukan penelitian mengenai pengukuran tekanan minimum cairan untuk sejumlah pelarut alkanolamina dengan membran PTFE dan diperoleh hasil bahwa morfologi permukaan fiber membran dapat berubah dengan adanya pelarut. Meniskus air ke dalam pori membran menyebabkan pembesaran pori membran sehingga tekanan minimum lebih rendah dibanding prediksi menggunakan persamaan di atas.

II.6 Material Membran

Penelitian ini menggunakan membran polipropilena (PP) karena jika dibandingkan dengan fiber lainnya (PE, PTFE, dan PVDF), membran PP menunjukkan aplikasi yang komprehensif karena tersedia dalam berbagai ukuran, porositas yang terkendali dengan baik, stabilitas termal dan kimia yang tinggi, dan biaya yang rendah jika dibandingkan dengan jenis membran yang lain (Rahmawati, 2014).

Dalam pemilihan material membran, ada beberapa kriteria dari material yang harus diperhatikan, yaitu:

- Stabilitas kimia

Stabilitas kimia dari material membran, memberikan efek terhadap stabilitas jangka panjangnya. Setiap reaksi yang terjadi antara solven dengan material fiber membran dapat mempengaruhi integritas dan struktur permukaan membran. Agar stabilitas kimia terjamin, bahan pelarut yang digunakan harus kompatibel dengan material membran.

- Stabilitas termal

Pada temperatur tinggi, material membran dapat mengalami dekomposisi atau degradasi. Kecenderungan perubahan membran tergantung pada temperatur transisi gelas (T_g) polimer untuk polimer amorf atau temperatur leleh (T_m) untuk polimer kristalin. Jika melewati temperatur tersebut, sifat polimer akan berubah secara drastis. Temperatur transisi gelas polimer ditentukan oleh struktur kimia seperti fleksibilitas dan interaksi ikatan rantai. Polimer yang mempunyai T_g lebih tinggi cenderung lebih stabil. Dalam **Tabel II.2** ditunjukkan bahwa PTFE memiliki T_g lebih tinggi dibandingkan PET dan PP sehingga sifatnya lebih stabil.

Tabel II.2 Temperatur Transisi Gelas (T_g) Polimer

Polimer	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
Politetrafluoroetilena (PTFE)	126
Polipropilena (PP)	-15
Polietilena (PE)	-120
Polieter sulfon (PES)	230
Polisulfon (PS)	190
Polivinildenefluorid (PVDF)	-40
Polidimetilsiloksana (PDMS)	-123

(Sumber: Mulder, 1996)

Material membran yang umum digunakan pada pemisahan CO_2 dengan kontaktor membran adalah PP dan PTFE. Disamping itu juga para peneliti telah mencoba beberapa jenis material lain, antara lain PDMS, PE, PES, PVDF, dan membran keramik.

- Politetrafluoroetilena (PTFE)

PTFE tersusun dari rantai karbon dimana setiap atom karbon mengikat dua atom fluorin.

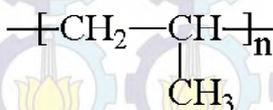


Gambar II.5 Struktur Politetrafluoroetilena (PTFE)

Membran PTFE merupakan membran yang hidrofobik dan paling stabil jika digunakan untuk pemisahan CO_2 dengan membran kontaktor. Studi yang dilakukan oleh Matsumoto dkk. (1995) memperoleh hasil bahwa hanya membran PTFE yang tidak mengalami pembasahan setelah dioperasikan selang waktu tertentu. Nishikawa dkk. (1995)

melaporkan bahwa kinerja membran PTFE stabil bahkan setelah dioperasikan selama 6.600 jam. Penelitian selanjutnya yang dilakukan oleh Falk-Pedersen (2001) juga mendapatkan hasil bahwa PTFE adalah material membran terbaik dengan koefisien perpindahan massa total volumetrik lebih besar.

- Polipropilena (PP)
Polipropilena juga bersifat hidrofobik, tetapi memiliki T_g yang rendah, sehingga kurang stabil dibanding PTFE dan rentan terhadap pembasahan. Kelebihannya yaitu harganya jauh lebih murah dibanding PTFE.



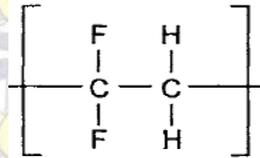
Gambar II.6 Struktur Polipropilena (PP)

Beberapa penelitian melaporkan bahwa PP cenderung mengalami pembasahan parsial. Misalnya percobaan yang dilakukan Wang dkk. (2006) yang memperoleh hasil bahwa pada beberapa jam pertama fluks CO_2 cenderung menurun sampai akhirnya bernilai konstan. Hal ini menunjukkan bahwa membran mengalami pembasahan pada awal percobaan dan kemudian stabil.

- Polidimetilsiloksana (PDMS)
Percobaan dengan menggunakan membran PDMS dilakukan oleh Nii dkk. (1995), mereka menggabungkan proses permeasi dan absorpsi gas dimana proses penggabungannya disebut *permabsorption*. Dari hasil percobaan diperoleh hasil persen pemisahan CO_2 yang memuaskan.

- Polivinilidenefluorid (PVDF)

PVDF memiliki hambatan kimia dan termal yang sangat bagus dan stabil pada kebanyakan senyawa kimia dan organik yang bersifat korosif, seperti asam, alkalin, oksidan, dan halogen. PVDF memiliki kinerja yang stabil terbukti dengan nilai fluksnya yang konstan setelah dioperasikan selama rentang waktu tertentu. (Atcharyawut dkk., 2006).



Gambar II.7 Struktur Polivinildenefluorid (PVDF)

- Polietilena (PE)

Membran mikropori polietilena memiliki kinerja yang jelek terbukti dengan terjadinya pembasahan saat digunakan pada kontaktor membran. Nishikawa dkk. (1995) melakukan perlakuan permukaan dengan material fluorokarbonik untuk meningkatkan hidrofobisitas membran. Namun, membran PE yang telah dimodifikasi tersebut memiliki kecenderungan untuk terdegradasi sehingga kinerjanya makin lama makin menurun.

II.7 Pemilihan Pelarut Alkanolamina

Pada proses absorpsi CO₂ dari gas alam, biasanya digunakan pelarut kimia golongan alkanolamina, yaitu monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA), dan metildietanolamina (MDEA), yang dipilih berdasarkan kecepatan laju absorpsi, kemampuan penyerapan CO₂ yang tinggi dan kemudahan regenerasi. Perbandingan Karakteristik Pelarut Alkanolamina dapat dilihat pada tabel **Tabel II.3** di bawah ini.

Tabel II.3 Perbandingan Karakteristik Pelarut Alkanolamina

Pelarut	Kelebihan	Kekurangan
<i>Monoethanole Amine</i> (MEA)	<ul style="list-style-type: none">• Mampu menghilangkan CO₂• <i>Recovery</i> CO₂ tinggi.• Harganya paling murah dibanding pelarut amin lainnya.	<ul style="list-style-type: none">• Paling korosif diantara DEA dan MDEA.• Kurang reaktif terhadap CO₂ dibandingkan DEA dan MDEA.• Tekanan uapnya tinggi sehingga banyak massa yang hilang saat diregenerasi.
<i>Diethanole Amine</i> (DEA)	<ul style="list-style-type: none">• Harganya tidak terlalu mahal.• Paling efektif menyerap CO₂ dibandingkan DEA dan MDEA.	<ul style="list-style-type: none">• Bersifat korosif
<i>Methyl Diethanole Amine</i> (MDEA)	<ul style="list-style-type: none">• Tidak korosif.• Banyak digunakan untuk absorpsi dengan kandungan CO₂ yang tinggi.• Energi untuk regenerasi rendah.	<ul style="list-style-type: none">• Akibat selektifannya yang tinggi terhadap H₂S, maka akan terjadi CO₂ <i>slippage</i> sehingga absorpsi CO₂ kurang maksimal.• Harganya paling mahal di antara pelarut amin lainnya.

(Sumber: Kohl & Nielsen, 1997 ; Kidnay, 2006)

Pada penelitian ini akan digunakan dietanolamina (DEA) karena sifat korosi yang lebih rendah dan laju absorpsi cukup dibandingkan MEA yang memiliki laju absorpsi CO₂ dan korosif paling tinggi, serta MDEA yang merupakan basa paling lemah dibanding MEA dan DEA (Wang dkk., 2004).

II.8 Posisi Penelitian (*State of Art*)

Dari penjelasan di atas, diperoleh suatu kesimpulan bahwa penelitian ini merupakan lanjutan dari penelitian-penelitian sebelumnya. Penelitian mengenai absorpsi-desorpsi CO₂ secara simultan menggunakan kontaktor membran serat berongga dengan pelarut bukanlah penelitian yang pertama, namun penelitian ini masih belum begitu banyak. Penelitian terdahulu lebih banyak membahas proses absorpsi dan desorpsi CO₂ secara terpisah melalui kontaktor membran. Posisi penelitian ini lebih jelasnya dapat digambarkan melalui tabel *State of the Art* berikut.

Tabel II.4 Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO₂ Secara Simultan Menggunakan Kontaktor Membran

Material/ Proses	Penelitian	Hasil	Referensi
PP/ simultan dalam sartu modul	Memodelkan dan mengukur permeabilitas dan faktor pemisahan melalui membran cair untuk sistem CO ₂ -N ₂ melalui berbagai tekanan parsial CO ₂ . Mereka menggunakan pendekatan <i>immobilized liquid membrane</i> dan	Hasilnya model ini tidak membutuhkan energi eks-ternal dan diperoleh nilai faktor pemisahan CO ₂ /N ₂ adalah dari 230-516.	Guha dkk. (1990)

Tabel II.4 Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO₂ Secara Simultan Menggunakan Kontaktor Membran (lanjutan)

Material/ Proses	Penelitian	Hasil	Referensi
PP/ simultan dalam sartu modul	larutan dietanolamina. Dalam sistem ini, DEA diamobilisasi dalam pori-pori membran PP mikro hidrofobik, dan gas He sebagai <i>sweep gas</i> .		
PTFE/ simultan dalam satu modul	Proses absorpsi-desorpsi secara simultan dalam satu unit kontaktor membran dengan pelarut AMP dan metil aminoetanol (MAE). Percobaan dilakukan dalam satu tangki yang berisi absorben dengan pengadukan untuk homo-genitas pelarut.	Selama 22 hari proses absorpsi-desorpsi berlangsung stabil. Selain itu, laju absorpsi dikontrol oleh reaksi kimia dan difusi CO ₂ dalam pori-pori terisi cairan pada reaksi regim lambat, sedangkan laju desorpsi dikontrol oleh reaksi kimia dan difusi di bagian pori terisi cairan dan lapisan stagnan pada reaksi regim tengah	Kumazawa (2000) dan Shimada dkk. (2006)

Tabel II.4 Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO₂ Secara Simultan Menggunakan Kontaktor Membran (lanjutan)

Material/ Proses	Penelitian	Hasil	Referensi
PP/ simultan dalam satu modul	Meneliti mengenai absorpsi dan desorpsi CO ₂ secara simultan dalam satu modul membran serat berongga polipropilena menyilang ganda pada tekanan vakum menggunakan pelarut air.	Hasil perhitungan perpindahan massa untuk variasi laju alir pelarut diperoleh oleh kesesuaian dengan hasil pengukuran perpindahan massa menggunakan kontaktor membran menyilang dengan efisiensi absorpsi dan desorpsi serta laju perpindahan massa memberikan hasil lebih tinggi dibanding proses absorpsi dan desorpsi terpisah. Efisiensi absorpsi mencapai 46% dan efisiensi desorpsi 45%.	Rahmawati (2014)

Tabel II.5 Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO₂ Menggunakan Kontaktor Membran

Proses	Membran	Pelarat	Dimensi Modul	Gas masuk	Q _t (ml/min)	Desorpsi	Pemisahan (%)	Fluks (mol/m ² .s)	Pustaka
Simultan dalam satu modul	PTFE	MAE: 0,5-2 M	Absorpsi: L: 30 cm A: 75,4 cm ² Desorpsi: L: 30 cm A: 754 cm ²	CO ₂ : 5-20%	Batch	Aliran N ₂ T: 30°C P: 1 atm	-	Laju absorpsi 10,9-12,9 > laju desorpsi	Shinada dkk. (2006)
Simultan dalam satu modul	PTFE	AMP: 0,5-2 M	Absorpsi: L: 30 cm A: 137 cm ² Desorpsi: L: 30 cm A: 1.370 cm ²	CO ₂ : 5-20%	Batch	Aliran N ₂ T: 30°C P: 1 atm	-	Absorpsi- desorpsi: 10 ⁻³ – 10 ⁻⁷	Kumazawa (2000)
Hibrid	PP	CORAL: 2 M	L: 5 cm A: 2,7.103 cm ²	CO ₂ : 0,05- 10%	8-300	T: 105°C	-	Absorpsi: 0,22 mol/m ² .s	Feron dkk. (2002)
Hibrid	PP	MEA & MDEA: 0,5-3 M	L: 80 cm A: 6,05.10 ⁴ cm ²	-	0,025-0,1 m/s	-	Absorpsi: 90	Absorpsi: 8,89.10 ⁻⁴ mol/m ² .s	Yan dkk. (2007)
Simultan beda modul	PVDF	Air	L: 15 cm A: 240 cm ²	CO ₂ murni	50-200	Aliran N ₂ T: 26-60°C	Desorpsi: < 30	Absorpsi: 8,5.10 ⁻⁴ Desorpsi: 3,0.10 ⁻⁸	Mansourizadeh dkk. (2011)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Garis Besar Penelitian

Secara garis besar uji kontaktor membran menyilang ganda dilakukan secara eksperimen di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, Teknik Kimia ITS. Dalam penelitian ini dilakukan proses absorpsi-desorpsi CO₂ secara simultan dalam modul membran dengan larutan DEA 30% berat sebagai pelarut. Pada proses absorpsi, gas CO₂ (gas umpan) mengalir di salah satu lumen dan larut ke dalam pelarut DEA yang diam (*batch*). Pada proses desorpsi, gas N₂ (*sweep gas*) mengalir di bagian lumen lain yang tegak lurus dengan aliran gas CO₂ dan meregenerasi pelarut dengan cara mengambil CO₂ yang ada dalam pelarut. Variabel yang digunakan adalah konsentrasi gas umpan, laju alir gas umpan, dan laju alir *sweep gas*. Konsentrasi CO₂ dalam gas keluar kontaktor membran dianalisa menggunakan *Gas Chromatography (GC) analyzer*, sedangkan morfologi membran dianalisa menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)*.

III.2 Bahan yang Digunakan

1. Membran *hollow fiber* polipropilena (spesifikasi karakteristik membran disajikan dalam **Tabel III.1**).
2. Gas umpan dengan konsentrasi CO₂ 40% dan 99,9%, *balance* N₂ (PT Aneka Gas Industri).
3. Gas N₂ dengan konsentrasi 99,95%, *balance* O₂ (PT Aneka Gas Industri).
4. Pelarut dietanolamina (DEA) 30% berat (PT Pertamina RU-VI Balongan).

Tabel III.1 Data Karakteristik Membran Polipropilena

Parameter	Keterangan
Diameter dalam (d_i) (mm)	0,35
Diameter luar (d_o) (mm)	0,5
Diameter pori (d_p) (μm)	0,2
Panjang fiber (mm)	83
Jumlah fiber	2.500
Jumlah lapisan	25
Luas kontak gas-cairan (m^2)	21,195
Porositas	0,65

III.3 Variabel Penelitian

III.3.1 Variabel Tetap

1. Konsentrasi pelarut DEA (30% berat).

III.3.2 Variabel Berubah

1. Konsentrasi CO_2 dalam gas umpan.
2. Laju alir gas umpan.
3. Laju alir gas N_2 (*sweep gas*).

Rentang nilai variabel yang digunakan ada pada **Tabel III.2**.

Tabel III.2 Rentang Nilai Variabel Berubah untuk Percobaan
Absorpsi-Desorpsi

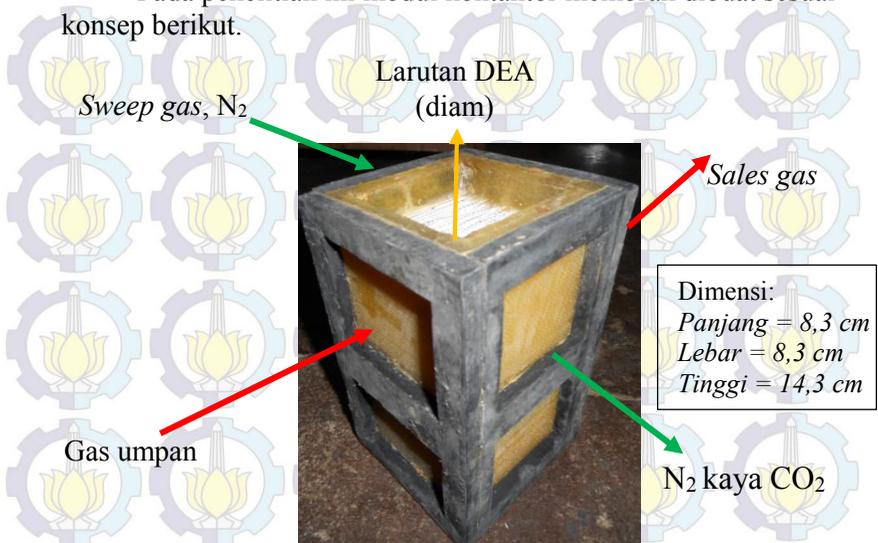
No.	Variabel	Nilai
1.	Konsentrasi CO_2 gas umpan (%volume)	40 dan 99,9 400 - 800
2.	Laju alir gas umpan (ml/menit)	400, 600, dan
3.	Laju alir gas N_2 (ml/menit)	800

III.3.3 Variabel Respon

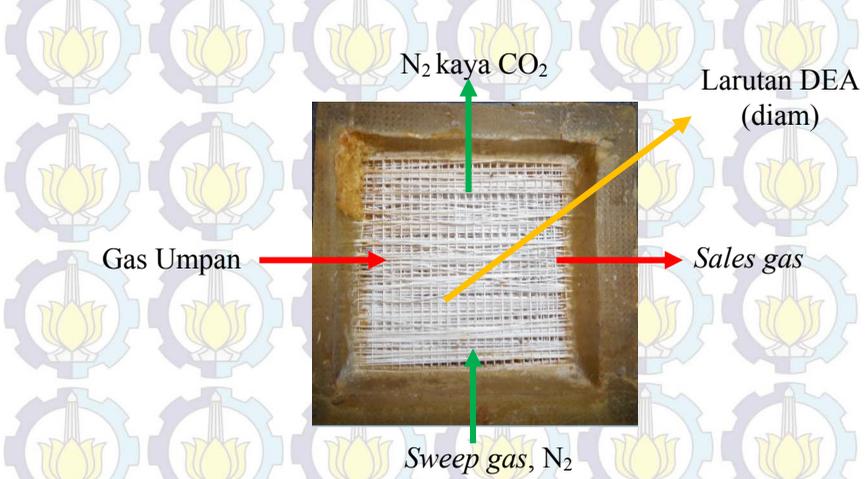
1. Laju perpindahan massa (fluks) absorpsi CO_2 .
2. Laju perpindahan massa (fluks) desorpsi CO_2 .
3. Efisiensi absorpsi CO_2 .
4. Efisiensi desorpsi CO_2 .
5. CO_2 loading pelarut.

III.4 Rangkaian Alat Penelitian

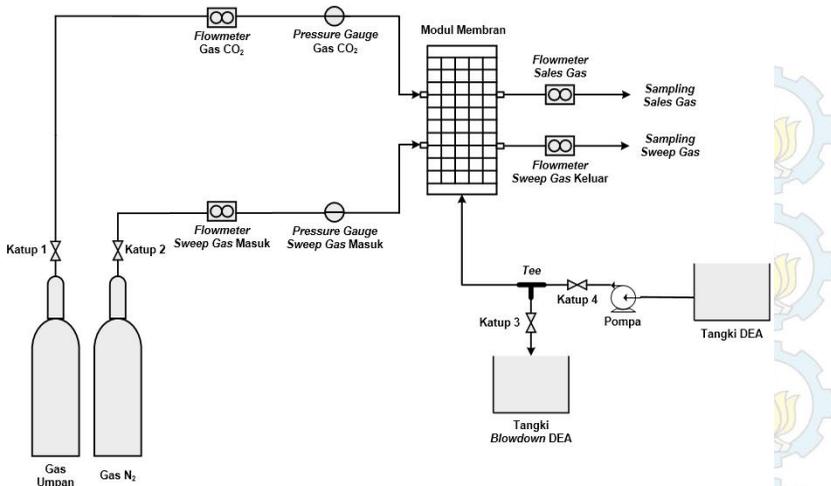
Pada penelitian ini modul kontaktor membran dibuat sesuai konsep berikut.



Gambar III.1 Modul Kontaktor Membran Tampak Samping



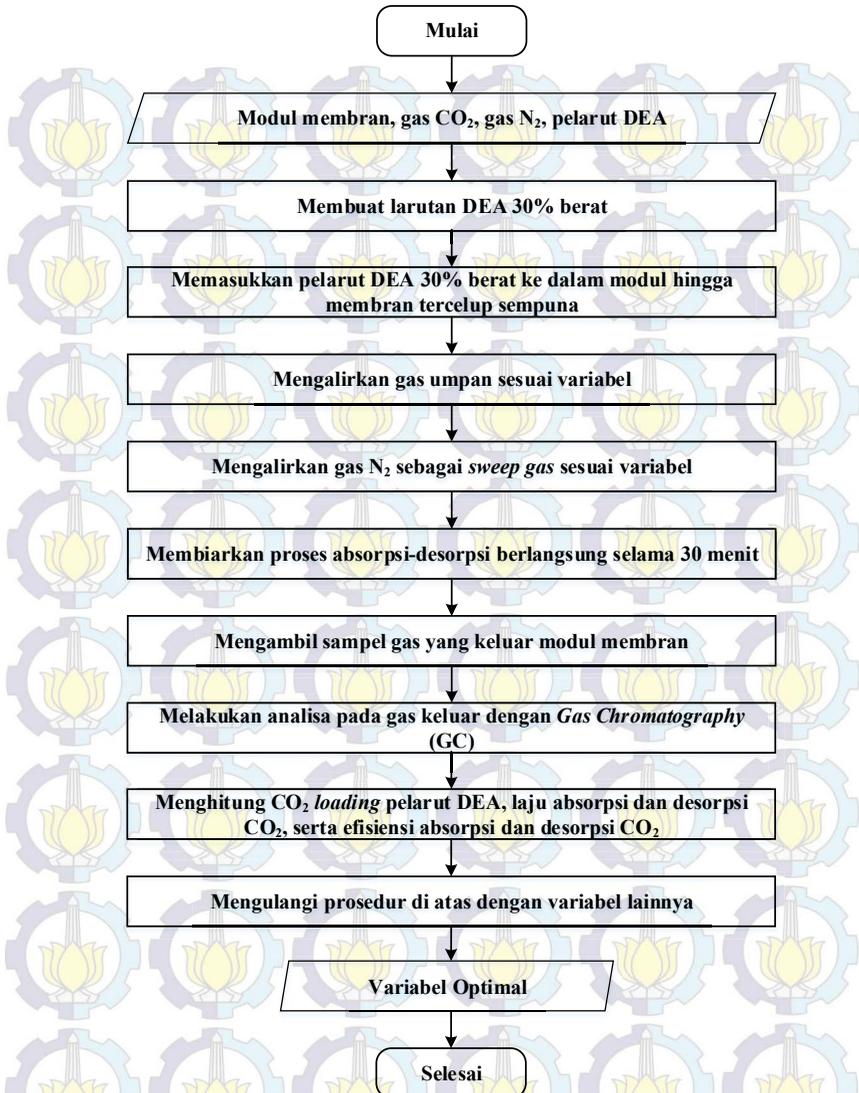
Gambar III.2 Penampang Modul Kontaktor Membran Tampak Atas



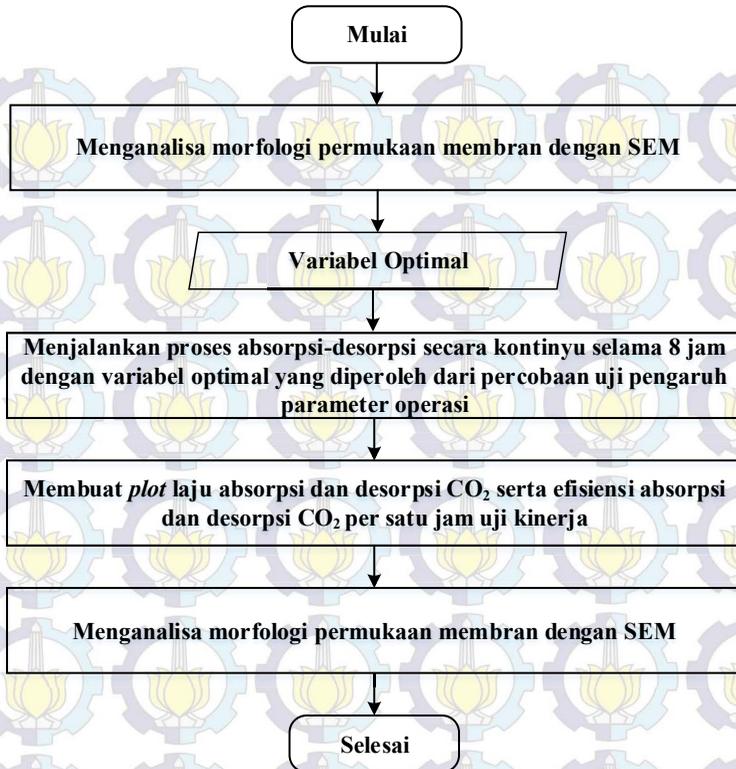
Gambar III.3 Rangkaian Peralatan Penelitian

III.5 Prosedur Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menguji kinerja modul kontaktor membran menyilang ganda untuk proses absorpsi-desorpsi secara simultan. Modul membran yang berbahan dasar polipropilena disusun secara menyilang dan berlapis secara bergantian. Gas umpam dan gas N₂ mengalir di bagian lumen membran secara menyilang dan simultan. Pada proses absorpsi, gas CO₂ mengalir secara kontinyu dengan laju alir gas bervariasi melewati lumen dengan pembacaan laju alir gas menggunakan *flowmeter*, sedangkan pelarut diam di bagian *shell*. Pada proses desorpsi, CO₂ yang terlarut dalam pelarut DEA di bagian *shell* berdifusi melewati pori membran yang dibantu dengan *sweep gas* (N₂ murni) untuk membantu proses regenerasi pelarut. Konsentrasi gas CO₂ dan *sweep gas* keluar modul dianalisa menggunakan *Gas Chromathography (GC) analyzer*. Secara skematik, prosedur penelitian ini disajikan pada **Gambar III.4** dan **Gambar III.5**.



Gambar III.4 Diagram Alir Percobaan Uji Pengaruh Parameter Operasi



Gambar III.5 Diagram Alir Percobaan Uji Kinerja

III.6 Prosedur Analisa Hasil Penelitian

Analisa hasil pada percobaan ini berupa analisa gas CO₂ menggunakan *Gas Chromatography (GC) analyzer* dan analisa morfologi membran. Sampel gas yang keluar modul dianalisa menggunakan *GC analyzer* untuk mengetahui kandungan CO₂-nya sehingga dapat ditentukan laju perpindahan massa CO₂. Analisa morfologi membran dilakukan untuk mengetahui kinerja membran yang berkaitan dengan pembasahan permukaan membran.

III.6.1 Analisa Konsentrasi Gas CO₂ Keluar Modul Membran & CO₂ Loading

Konsentrasi gas CO₂ keluar modul membran dianalisa dengan metode *Gas Chromatography* (GC). GC analyzer menggunakan kolom PorapakQ yang dapat mendeteksi gas-gas seperti CO₂, O₂, CO, dan N₂. Injeksi gas ke dalam alat menggunakan *syringe* khusus gas. *Carrier gas* yang dipakai oleh GC analyzer ini adalah gas helium (He). Dari analisa ini dapat diketahui konsentrasi dari gas CO₂, yang nantinya digunakan untuk menghitung fluks absorpsi (J_{CO_2}) dan efisiensi absorpsi (η) dengan menggunakan persamaan yang digunakan oleh (Lv dkk., 2011):

$$J_{CO_2} = \frac{(Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}) \times 273,15}{0,0224 \times T_g \times S} \quad (III.1)$$

$$\eta = \frac{Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}}{Q_{in} \times C_{in}} \times 100\% \quad (III.2)$$

di mana Q_{in} dan Q_{out} adalah laju alir gas umpan dan laju alir *sales gas* (m³/jam), η adalah efisiensi absorpsi (%), C_{in} dan C_{out} adalah konsentrasi CO₂ dalam gas umpan dan *sales gas* (%), T_g adalah temperatur gas (K), dan S adalah luas kontak gas-cair pada permukaan membran (m²).

Sedangkan untuk proses desorpsi menggunakan persamaan berikut.

$$J'_{CO_2} = \frac{(V_{out} \times K_{out}) \times 273,15}{0,0224 \times T_g \times S} \quad (III.3)$$

$$\eta' = \frac{V_{out} \times K_{out}}{Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}} \times 100\% \quad (III.4)$$

di mana J'_{CO_2} adalah fluks desorpsi ($\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$), η' adalah efisiensi desorpsi (%), V_{out} adalah laju alir gas N_2 (*sweep gas*) keluar (m^3/jam), Q_{in} dan Q_{out} adalah laju alir gas umpan dan laju alir *sales gas* (m^3/jam), K_{out} adalah konsentrasi CO_2 dalam *sweep gas* keluar (%), C_{in} dan C_{out} adalah konsentrasi CO_2 dalam gas umpan dan *sales gas* (%), T_g adalah temperatur gas (K), dan S adalah luas kontak gas-cair pada permukaan membran (m^2).

CO_2 loading pelarut didefinisikan sebagai jumlah mol CO_2 yang diserap per mol pelarut, yang dirumuskan dengan:

$$\text{CO}_2 \text{ loading} = \frac{Q_{in} \times C_{in} - (Q_{out} \times C_{out} + V_{out} \times K_{out})}{n_{DEA}} \times 0,001 \quad (\text{III.5})$$

di mana Q_{in} dan Q_{out} adalah laju alir gas umpan dan laju alir *sales gas* (m^3/jam), C_{in} dan C_{out} adalah konsentrasi CO_2 dalam gas umpan dan *sales gas* (%), V_{out} adalah laju alir gas N_2 (*sweep gas*) keluar (m^3/jam), K_{out} adalah konsentrasi CO_2 dalam *sweep gas* keluar (%), dan n_{DEA} adalah jumlah mol pelarut DEA 30% berat.

III.6.2 Analisa Kinerja Membran

Kinerja membran dianalisa dengan meninjau parameter laju perpindahan massa dan efisiensi pemisahan CO_2 dalam kontaktor membran yang dioperasikan secara kontinyu selama 8 jam menggunakan parameter operasi optimum yang telah ditetapkan sebelumnya. Selain itu, bentuk permukaan membran sebelum dan sesudah perendaman dengan pelarut DEA juga dianalisa untuk mengetahui pengaruh fenomena pembasahan terhadap permukaan membran. Semakin lama perendaman (semakin lama membran dioperasikan) maka semakin besar efek pembasahan pada permukaan membran (Dindore dkk., 2004). Pembasahan akan menurunkan performa membran

dalam proses absorpsi-desorpsi. Permukaan membran dianalisa dengan SEM (*Scanning Electron Microscope*).

III.6.3 Pengolahan Data Hasil Penelitian dengan DesignExpert® 9

Proses pengolahan data dalam penelitian ini dibantu dengan perangkat lunak statistik DesignExpert® 9. Jumlah tempuhan yang harus dilakukan menurut variabel yang digunakan adalah 50 tempuhan. Namun, dengan menggunakan perangkat lunak ini, jumlah tempuhan dapat dikurangi hingga 19 tempuhan.

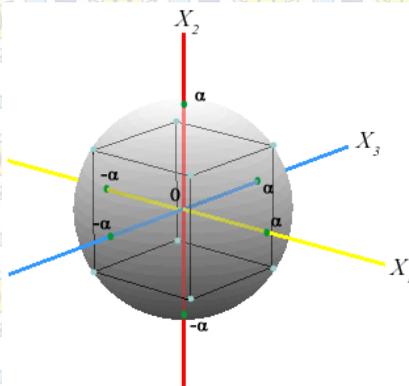
Tabel III.3 Jumlah Tempuhan Penelitian Setelah Menggunakan DesignExpert® 9

Tempuhan	Konsentrasi CO ₂ (% volume)	Laju Alir Sweep Gas Masuk (ml/min)	Laju Alir Gas Umpan (ml/min)
1*	40	400	400
2 [#]	40	400	800
3*	40	600	600
4 [#]	40	800	400
5*	40	800	800
6 [#]	69,95	400	600
7 [#]	69,95	600	400
8 ⁺	69,95	600	600
9 ⁺	69,95	600	600
10 ⁺	69,95	600	600
11 ⁺	69,95	600	600

Tabel III.3 Jumlah Tempuhan Penelitian Setelah Menggunakan DesignExpert® 9 (lanjutan)

Tempuhan	Konsentrasi CO ₂ (% volume)	Laju Alir Sweep Gas Masuk (ml/min)	Laju Alir Gas Umpan (ml/min)
12 ⁺	69,95	600	600
13 [#]	69,95	600	800
14 [#]	69,95	800	600
15 [*]	99,9	400	400
16 [#]	99,9	400	800
17 [*]	99,9	600	600
18 [#]	99,9	800	400
19 [*]	99,9	800	800

Untuk mendapatkan 19 dari 50 tempuhan tersebut digunakan metode *central composite design* yang secara ringkas dapat digambarkan sebagai berikut.



(sumber: <http://onlinecourses.science.psu.edu>)

Gambar III.6 Ilustrasi 3 Dimensi Semua Titik Eksperimen pada Permukaan Bola dengan Metode *Central Composite Design*

Gambar III.6 merepresentasikan pengolahan data berdasarkan desain komposit pusat/*Central Composite Design* (CCD) dengan menggunakan nilai $k=3$, dimana k menunjukkan dimensi permodelan dari pengolahan data eksperimen. Nilai $k=3$ dipilih karena dapat menghasilkan wilayah prediksi hasil eksperimen tiga dimensi berbentuk bola dengan dimensi kotak didalamnya sehingga akan diperoleh prediksi wilayah hasil eksperimen yang optimal.

Dalam pengolahan data menggunakan CCD, terdapat alternatif pilihan di mana $\alpha = (n_F)^{1/4}$ (akar keempat jumlah titik di bagian faktorial dari desain) memberikan model desain yang dapat diputar, seperti yang terlihat di **Gambar III.6**. Pada model ini, jika terdapat k faktor, maka terdapat pula 2^k poin faktorial, $2*k$ poin aksial, dan poin pusat n_c yang jumlah semua poin tersebut menyatakan jumlah variabel yang harus diteliti secara eksperimen. Data yang diperoleh kemudian diolah untuk mendapatkan nilai hasil permodelan untuk variabel yang lain.

Sebagaimana telah ditentukan, nilai k pada pengolahan data penelitian ini adalah 3 ($k=3$), maka akan diperoleh nilai-nilai sebagai berikut.

2^k poin faktorial	: 8
$2*k$ poin aksial	: 6
<u>Poin pusat n_c (varian)</u>	<u>: 5 +</u>
Total	: 19

Dari perhitungan di atas dapat diketahui bahwa terdapat 19 tempuhan yang harus diteliti secara eksperimen yang terdiri dari 8 tempuhan sebagai poin faktorial, 6 tempuhan sebagai poin aksial, dan 5 tempuhan sebagai poin pusat n_c , dimana untuk masing-masing tempuhan poin faktorial, poin aksial, dan poin pusat n_c dapat dilihat pada **Tabel III.3** yang secara berturut-turut yang ditandai dengan *, #, dan +.

Dari 19 tempuhan tersebut, terdapat 5 variabel yang sama. Variabel-variabel yang sama tersebut harus tetap dilakukan secara eksperimen karena 5 variabel tersebut sangat terkait dengan varian dari nilai prediksi. Alasan lain adalah karena 5 variabel tersebut bertindak sebagai variabel koreksi sehingga nilai prediksi nantinya dapat mewakili nilai-nilai di seluruh wilayah, terutama di dekat pusat karena diharapkan bahwa nilai optimal adalah di wilayah tengah. Maka, dengan memilih 5-6 poin pusat, akan membuat data nilai prediksi lebih presisi (kira-kira sama) antara data varian di tengah dengan data varians di tepi.

Dari 19 tempuhan di atas, perangkat lunak ini dapat memprediksi tren hubungan variabel respon terhadap variabel berubah. Hubungan antara variabel respon dengan variabel berubah diwujudkan dengan persamaan regresi yang juga dilengkapi dengan informasi koefisien korelasi (R^2) untuk mengetahui seberapa kuat hubungan persamaan regresi dengan ke 19 titik percobaan yang merupakan variabel berubah. Persamaan regresi ini nantinya dapat digunakan untuk membuat grafik sehingga dapat dilihat kecenderungan variabel respon terhadap variabel berubah awal.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mempelajari pengaruh parameter operasi seperti konsentrasi CO₂, laju alir gas CO₂ (gas umpan), dan laju alir gas N₂ (*sweep gas*) terhadap laju perpindahan massa dan efisiensi pemisahan CO₂ dalam modul kontaktor membran menyilang ganda dengan konsentrasi gas CO₂ yang tinggi. Parameter operasi yang optimal kemudian digunakan sebagai variabel untuk menguji kinerja kontaktor membran secara kontinyu selama 8 jam untuk mengetahui besar fluks absorpsi dan desorpsi CO₂ serta efisiensi pemisahannya. Respon yang diukur untuk kedua tujuan tersebut adalah laju perpindahan massa (fluks) absorpsi dan desorpsi CO₂ serta efisiensi absorpsi dan desorpsi CO₂. Prinsip dasar dari perpindahan massa CO₂ baik absorpsi maupun desorpsi dalam penelitian ini adalah akibat adanya perbedaan konsentrasi sehingga mendorong difusi gas CO₂ dari konsentrasi yang tinggi ke konsentrasi yang rendah.

Dalam penelitian ini, konfigurasi membran yang digunakan adalah menyilang dengan proses absorpsi dan desorpsi terjadi secara simultan dalam satu modul membran. Konfigurasi seperti ini masih jarang ditemui di penelitian-penelitian sebelumnya. Penelitian yang dilakukan oleh Mansourizadeh (2011) antara absorpsi dan desorpsi terjadi secara simultan, namun pada dua modul membran berbeda. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Shimada dkk. (2006), proses absorpsi dan desorpsi terjadi simultan dalam satu modul, tetapi konfigurasinya acak (tidak disusun secara menyilang).

Penelitian ini menggunakan variabel berubah konsentrasi CO₂ dalam gas umpan sebesar 40% dan 99,9%. Variabel respon untuk konsentrasi CO₂ 40% dihasilkan dari percobaan dan pendekatan statistik Design Expert® 9, sedangkan variabel respon untuk konsentrasi CO₂ 99,9% didekati dengan hasil perhitungan statistik Design Expert® 9. Variabel yang diperhitungkan untuk mendapatkan variabel respon menggunakan pendekatan model

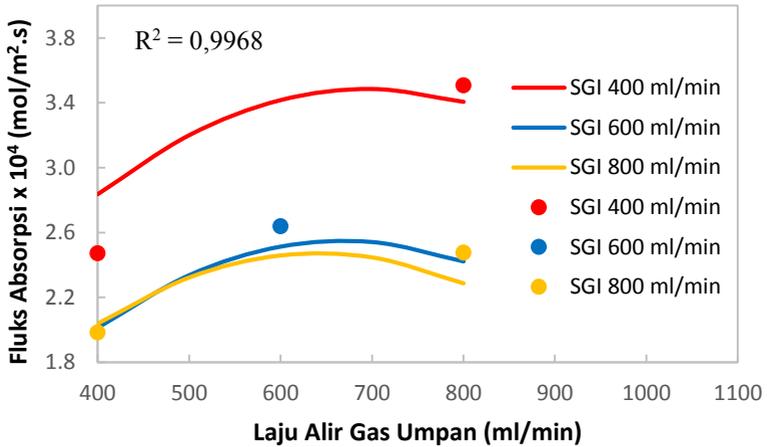
statistik adalah konsentrasi gas CO₂, laju alir gas umpan, dan laju alir *sweep gas* masuk.

IV.1 Uji Pengaruh Parameter Operasi

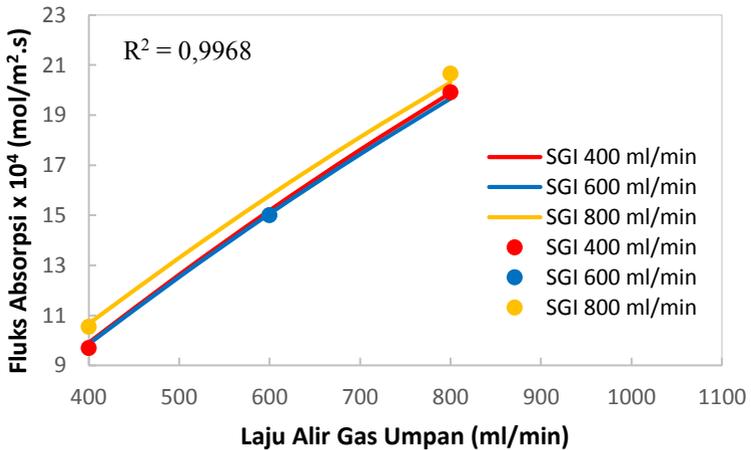
Tujuan pertama pada penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh parameter operasi seperti konsentrasi CO₂, laju alir gas CO₂ (gas umpan), dan laju alir N₂ (*sweep gas*) terhadap laju perpindahan massa dan efisiensi pemisahan CO₂ dalam modul kontakor membran.

Variabel yang digunakan untuk tujuan pertama ini adalah gas campuran (gas umpan) dengan konsentrasi 40% CO₂ + 60% N₂ dan 99,9% CO₂ + 0,1% N₂, serta laju alir gas umpan masuk sebesar 400-800 ml/menit dan laju alir *sweep gas* masuk sebesar 400, 600, dan 800 ml/menit. Tekanan yang digunakan adalah 1 atm pada suhu ambien (suhu ruangan).

Percobaan pertama dilakukan pada konsentrasi gas CO₂ 40% dengan laju alir sebesar 400-800 ml/menit. Untuk melakukan proses absorpsi gas CO₂, modul membran diisi dengan pelarut dietanolamina (DEA) 30% berat hingga semua fiber membran di dalam modul terendam sempurna. Gas N₂ digunakan sebagai gas penyapu (*sweep gas*) yang akan menyerap gas CO₂ (desorpsi) yang terdapat dalam pelarut DEA sehingga terjadi regenerasi DEA. Laju alir *sweep gas* masuk adalah 400, 600, dan 800 ml/menit. Proses absorpsi CO₂ oleh DEA dan desorpsi oleh gas N₂ terjadi dalam satu modul secara simultan. Setelah 30 menit proses berjalan, *sales gas* (gas umpan yang keluar modul membran) dan *sweep gas* yang keluar modul membran dianalisa menggunakan *gas chromatography analyzer*. Kemudian dilanjutkan dengan percobaan kedua menggunakan gas CO₂ 99,9% dengan variabel yang sama dengan percobaan pertama.



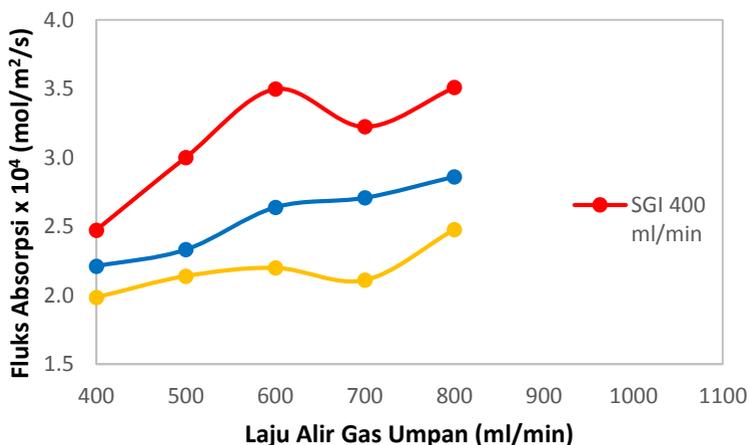
Gambar IV.1 Pengaruh Laju Alir Gas Umpam terhadap Fluks Absorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% dengan Pendekatan Statistik



Gambar IV.2 Pengaruh Laju Alir Gas Umpam terhadap Fluks Absorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik

Sebagai hasil dari sebuah persamaan regresi, maka setiap grafik akan dilengkapi dengan koefisien korelasi (R^2) yang menunjukkan seberapa eratny hubungan antara variabel berubah dengan varibel respon yang dihasilkan. Koefisien korelasi yang dihasilkan di sini adalah koefisien korelasi *overall* untuk satu variabel respon, mengingat persamaan regresinya juga untuk satu variabel respon. Misal variabel respon di sini adalah fluks absorpsi, maka persamaan regresi dan koefisien korelasinya akan sama, baik untuk konsentrasi CO_2 40% dan 99,9%, maupun untuk berbagai laju alir *sweep gas*. Hal ini juga berlaku untuk variabel respon lainnya (fluks desorpsi, efisiensi absorpsi, efisiensi desorpsi, dan CO_2 loading). Persamaan regresi untuk setiap variabel respon terlampir di halaman appendix.

Titik-titik pada grafik di **Gambar IV.1** dan **Gambar IV.2** adalah titik percobaan yang dilakukan secara eksperimental. Titik-titik percobaan tersebut sudah dapat mewakili hasil keseluruhan. Hal ini terbukti dengan nilai koefisien korelasi yang mendekati 1.



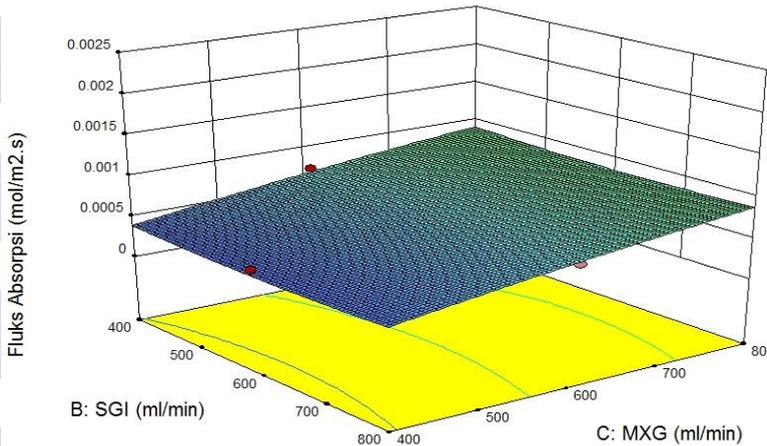
Gambar IV.3 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Absorpsi CO_2 pada Berbagai Laju Alir *Sweep Gas In* (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO_2 40% Hasil Percobaan Eksperimental

Seperti yang terlihat pada **Gambar IV.1** dan **Gambar IV.2**, semakin besar konsentrasi gas CO₂, semakin besar fluks absorpsi. Konsentrasi CO₂ yang semakin besar akan membuat perbedaan konsentrasi semakin besar sehingga CO₂ dapat dengan cepat berdifusi ke dalam pelarut DEA.

Untuk laju alir *sweep gas* yang sama, semakin besar laju alir gas umpan, semakin besar fluks absorpsinya. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Lv dkk. (2011), laju alir gas yang semakin besar menyebabkan peningkatan laju perpindahan massa CO₂ pada aliran gas CO₂ di dalam membran dan akan mengurangi ketebalan lapisan batas gas yang menyebabkan jumlah gas CO₂ yang terdistribusi 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 besar. Untuk konsentrasi gas CO₂ 40%, tren yang dihasilkan oleh percobaan dan oleh pendekatan statistik sedikit berbeda. Hasil percobaan menunjukkan fluks absorpsi semakin naik jika laju alir gas umpan semakin besar, sedangkan hasil pendekatan statistik menunjukkan fluks absorpsi naik kemudian sedikit turun pada laju alir gas umpan 800 ml/min.

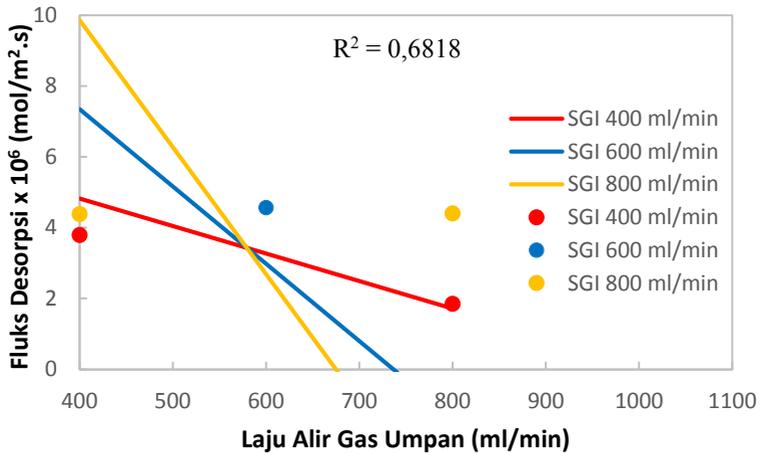
Untuk laju alir gas umpan yang sama, fluks absorpsi pada kedua konsentrasi menunjukkan hasil yang cukup berbeda. Untuk konsentrasi gas CO₂ 40%, baik secara percobaan maupun dengan pendekatan statistik, semakin besar laju alir *sweep gas*, semakin kecil fluks absorpsi. Hal ini dapat disebabkan karena laju alir *sweep gas* yang semakin besar akan mengurangi waktu tinggal *sweep gas* tersebut di dalam kontaktor membran (Lv dkk., 2011) sehingga CO₂ yang ada dalam pelarut kurang dapat ditarik keluar. Kurang maksimalnya penarikan CO₂ dalam pelarut akan mengakibatkan pelarut cepat mengalami kejenuhan dan pada akhirnya akan menurunkan fluks absorpsi CO₂. Sedangkan untuk konsentrasi gas CO₂ 99,9%, laju alir *sweep gas* tidak terlalu berpengaruh terhadap besar fluks absorpsi.

- MXG (*Mixed Gas*) = Gas Umpam - SGI (*Sweep Gas In*)

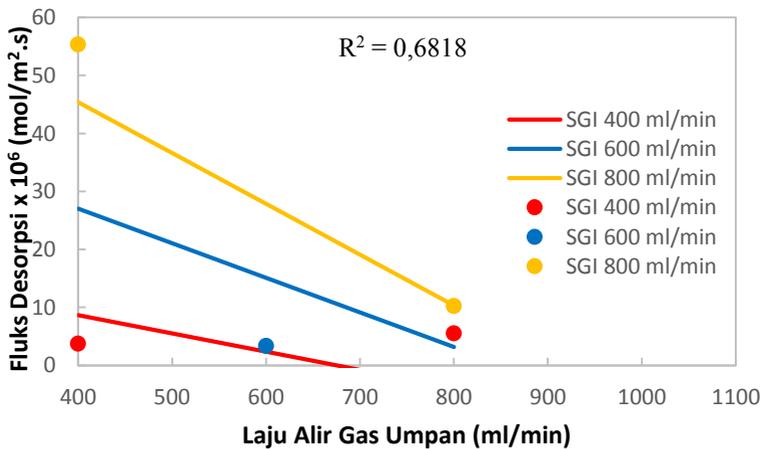


Gambar IV.4 *Response Surface* Fluks Absorpsi

Secara keseluruhan, untuk laju alir *sweep gas* yang sama, fluks absorpsi semakin besar jika laju alir gas umpam semakin besar. Hal ini dapat dilihat di **Gambar IV.4** dimana *respon surface* menunjukkan bentuk yang semakin naik seiring dengan semakin besarnya laju alir gas umpam. Untuk laju alir gas umpam yang sama, laju alir *sweep gas* tidak terlalu berpengaruh terhadap besarnya fluks absorpsi. Seperti yang terlihat di **Gambar IV.4**, grafik *response surface* menunjukkan bentuk yang datar, artinya pengaruh laju alir *sweep gas* terhadap fluks absorpsi tidak signifikan.

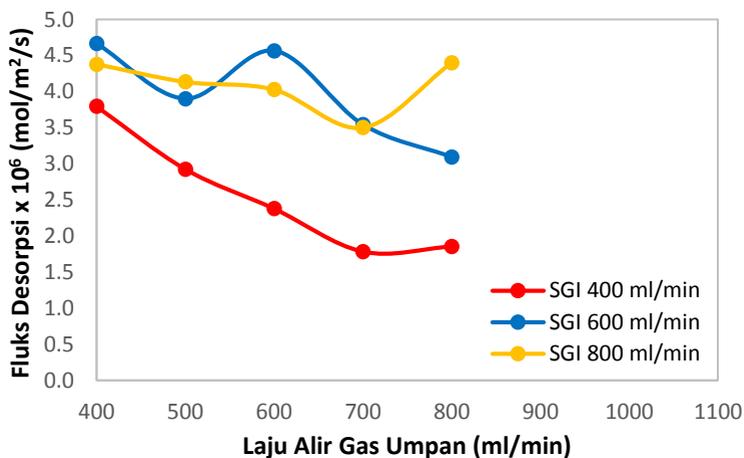


Gambar IV.5 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Desorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% dengan Pendekatan Statistik



Gambar IV.6 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Desorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik

Seperti yang terlihat di **Gambar IV.5** dan **Gambar IV.6**, titik percobaan menyimpang cukup jauh dari grafik pendekatan statistik, terbukti dengan koefisien korelasinya yang kecil. Hal ini dapat disebabkan karena adanya faktor lain yang tidak diperhitungkan dalam pendekatan model statistik, faktor pembasahan permukaan membran misalnya. Seperti yang diketahui, semakin lama membran dioperasikan akan semakin meningkatkan resiko masuknya pelarut ke dalam pori-pori membran sehingga menghambat laju perpindahan massa.



Gambar IV.7 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Fluks Desorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% Hasil Percobaan Eksperimental

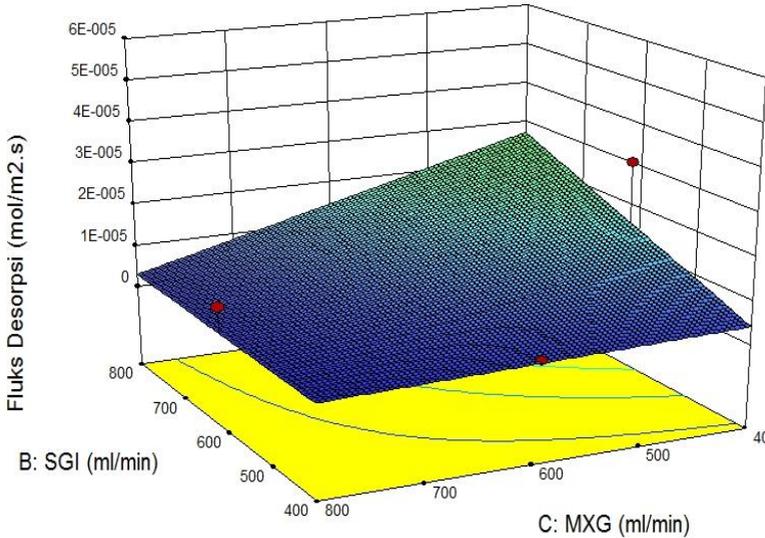
Gambar IV.5 dan **Gambar IV.6** menunjukkan grafik fluks desorpsi CO₂ pada berbagai laju alir gas umpan dan laju alir sweep gas. Dari grafik dapat dilihat bahwa semakin besar konsentrasi gas CO₂, semakin besar fluks desorpsi. Hal ini karena konsentrasi CO₂ yang besar akan mendorong fluks absorpsi yang besar. Fluks absorpsi yang besar menandakan jumlah CO₂ dalam pelarut

semakin banyak. Semakin banyaknya jumlah CO₂ dalam pelarut akan semakin meningkatkan perbedaan konsentrasi CO₂ antara pelarut dan *sweep gas* sehingga CO₂ dapat dengan cepat berdifusi ke dalam *sweep gas*.

Untuk laju alir *sweep gas* yang sama, semakin besar laju alir gas umpan, semakin kecil fluks desorpsi. Hal ini karena semakin besar laju alir gas umpan maka semakin besar fluks absorpsi. Fluks absorpsi yang semakin besar menandakan bahwa penyerapan CO₂ oleh pelarut DEA semakin besar. Dengan semakin banyaknya CO₂ dalam pelarut, dimana jumlah *sweep gas* tetap sama, maka fluks desorpsi akan semakin menurun karena jumlah *sweep gas* yang ada tidak sebanding dengan jumlah CO₂ yang ingin didesorp. Grafik fluks desorpsi untuk konsentrasi 99,9% menunjukkan hal yang senada dengan teori dimana untuk laju alir *sweep gas* yang sama, fluks desorpsi semakin turun dengan semakin naiknya laju alir gas umpan. Namun, ada penyimpangan pada tren grafik fluks desorpsi untuk konsentrasi CO₂ 40%. Terlihat bahwa ada perpotongan antar grafik, baik hasil dari percobaan maupun dari pendekatan statistik. Penyimpangan ini disebabkan karena hasil percobaan yang tidak menunjukkan kecenderungan antara variabel berubah dan variabel respon. Seperti yang dapat dilihat di **Gambar IV.7**, terutama untuk *sweep gas* in 600 ml/min dan 800 ml/min, grafik yang dihasilkan kadang turun dan kadang naik.

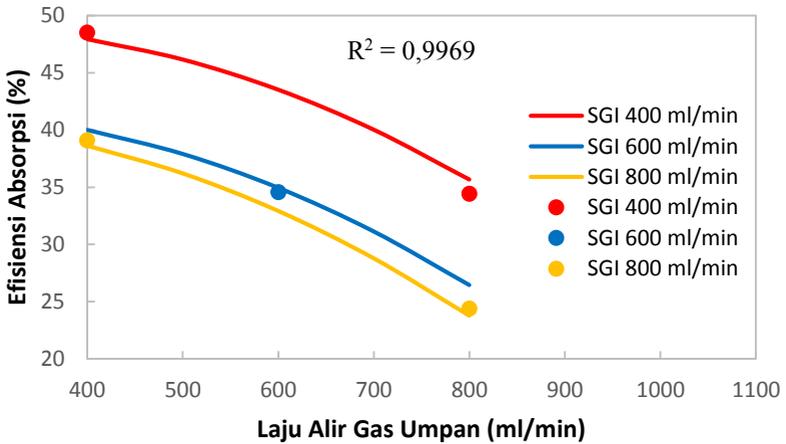
Untuk laju alir gas umpan yang sama, fluks desorpsi semakin besar dengan semakin naiknya laju alir *sweep gas*. Seperti yang telah diteliti oleh Lv dkk. (2011) bahwa semakin besar laju alir gas akan membuat turbulensi aliran sehingga akan merusak dan mengurangi ketebalan lapisan batas gas yang menyebabkan semakin mudahnya gas CO₂ berdifusi keluar.

- MXG (*Mixed Gas*) = Gas Umpan - SGI (*Sweep Gas In*)

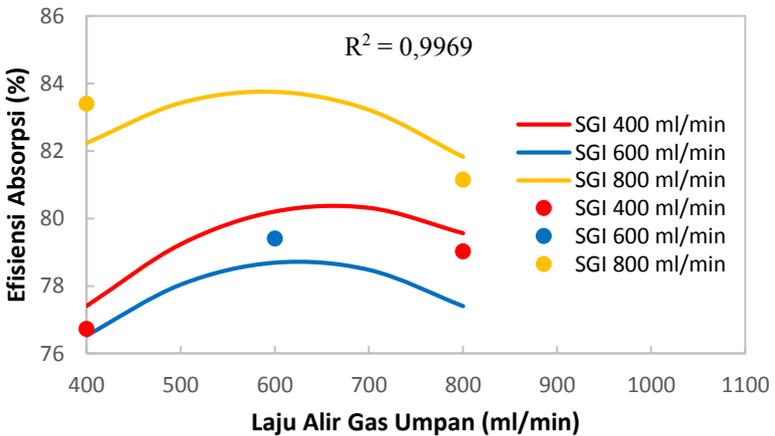


Gambar IV.8 Response Surface Fluks Desorpsi

Seperti yang terlihat di **Gambar IV.8**, secara keseluruhan, untuk laju alir *sweep gas* yang sama, fluks desorpsi naik seiring dengan turunnya laju alir gas umpan. Ini terlihat dengan semakin naiknya permukaan grafik saat laju alir gas umpan semakin kecil. Untuk laju alir gas umpan yang sama, fluks desorpsi naik seiring naiknya laju alir *sweep gas*. Ini terlihat dengan semakin naiknya permukaan grafik saat laju alir *sweep gas* semakin besar.

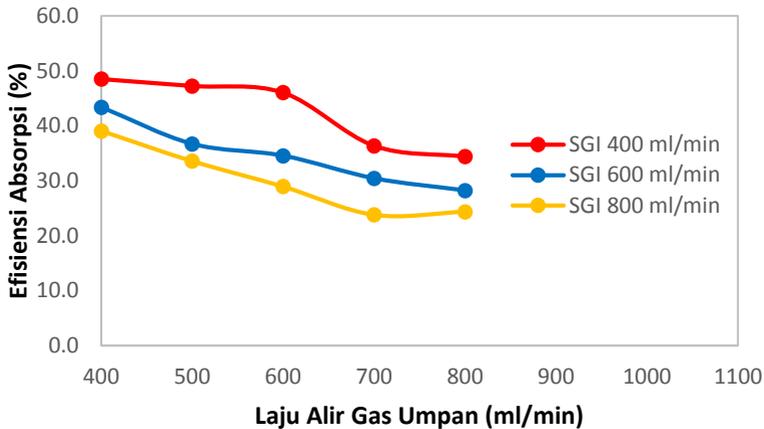


Gambar IV.9 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO₂ pada Berbagai Laju *Alir Sweep Gas In* (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% dengan Pendekatan Statistik



Gambar IV.10 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO₂ pada Berbagai Laju *Alir Sweep Gas In* (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik

Titik-titik percobaan pada grafik di **Gambar IV.9** dan **Gambar IV.10** sudah dapat mewakili hasil keseluruhan. Hal ini terbukti dengan nilai koefisien korelasi yang mendekati 1.



Gambar IV.11 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Absorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% Hasil Percobaan Eksperimental

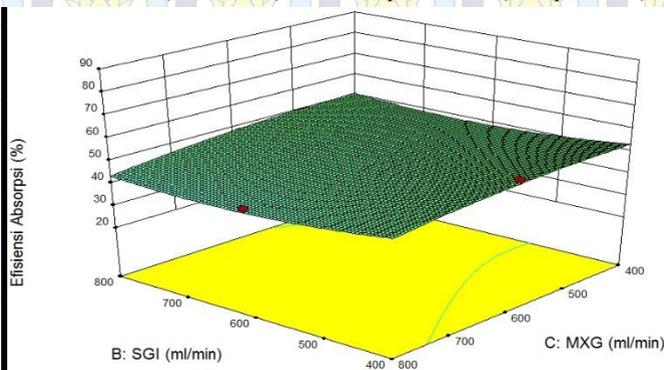
Gambar IV.9 dan **Gambar IV.10** menunjukkan grafik efisiensi absorpsi CO₂ pada berbagai laju alir gas umpan dan *sweep gas*. Seperti yang terlihat pada grafik, semakin besar konsentrasi gas CO₂, semakin besar efisiensi absorpsi. Hal ini karena semakin banyak CO₂ akan meningkatkan fluks absorpsi akibat semakin besarnya perbedaan konsentrasi. Fluks absorpsi yang meningkat menandakan banyak CO₂ yang terabsorpsi ke dalam pelarut sehingga dengan demikian efisiensi absorpsi pun meningkat.

Untuk laju alir *sweep gas* yang sama, semakin besar laju alir gas umpan, maka semakin rendah efisiensi absorpsinya. Hal ini karena pada laju alir gas umpan yang semakin cepat maka waktu tinggal gas dalam membran akan semakin singkat sehingga mengurangi waktu kontak gas dengan kontaktor membran. Hasil

tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan Lv dkk. (2011) yang menjelaskan pada kenaikan laju alir gas, waktu tinggal gas di dalam kontaktor membran semakin singkat. Waktu tinggal yang singkat menyebabkan laju difusi CO₂ melalui pori-pori membran fiber menurun sehingga menyebabkan menurunnya nilai efisiensi absorpsi CO₂. Selain itu, hasil penelitian Kim & Yang (2000) menunjukkan bahwa pada laju reaksi yang tinggi, efisiensi absorpsi akan semakin turun dengan naiknya laju alir gas umpan. Teori dan hasil penelitian terdahulu tentang efisiensi absorpsi ini sesuai untuk konsentrasi gas CO₂ 40%, baik hasil percobaan maupun pendekatan statistik. Namun, terjadi penyimpangan untuk konsentrasi gas CO₂ 99,9% dimana efisiensi absorpsi naik kemudian turun.

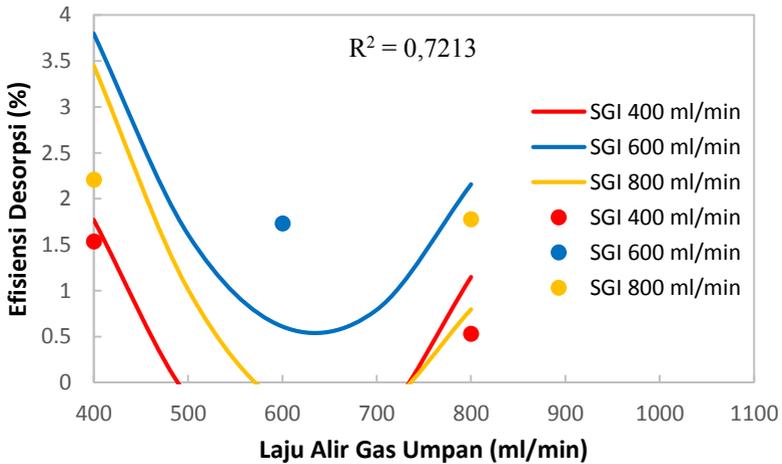
Untuk laju alir gas umpan yang sama, semakin besar laju alir *sweep gas*, efisiensi absorpsi semakin kecil. Hal ini dapat disebabkan karena laju alir *sweep gas* yang semakin besar akan mengurangi waktu tinggal *sweep gas* tersebut di dalam kontaktor membran (Lv dkk., 2011) sehingga CO₂ yang ada dalam pelarut kurang dapat ditarik keluar. Semakin banyak CO₂ dalam pelarut akan mengakibatkan pelarut semakin jenuh sehingga daya absorp pelarut semakin rendah. Penyerapan CO₂ yang rendah akan mengakibatkan efisiensi absorpsi yang rendah.

- MXG (*Mixed Gas*) = Gas Umpan - SGI (*Sweep Gas In*)

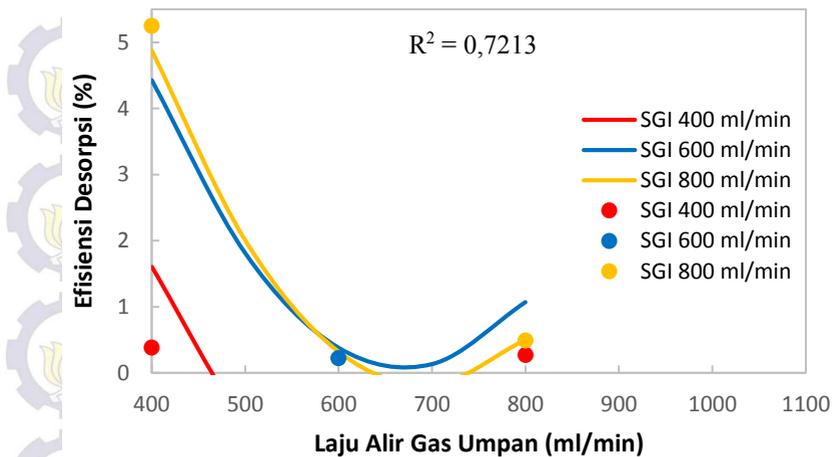


Gambar IV.12 *Response Surface* Efisiensi Absorpsi

Seperti yang terlihat di **Gambar IV.12**, secara keseluruhan, untuk laju alir *sweep gas* yang sama, efisiensi absorpsi naik sering dengan turunnya laju alir gas umpan. Ini terlihat dengan semakin naiknya permukaan grafik saat laju alir gas umpan semakin kecil. Untuk laju alir gas umpan yang sama, efisiensi absorpsi naik seiring dengan semakin turunnya laju alir *sweep gas*. Ini terlihat dengan permukaan grafik yang naik saat laju alir *sweep gas* semakin turun.

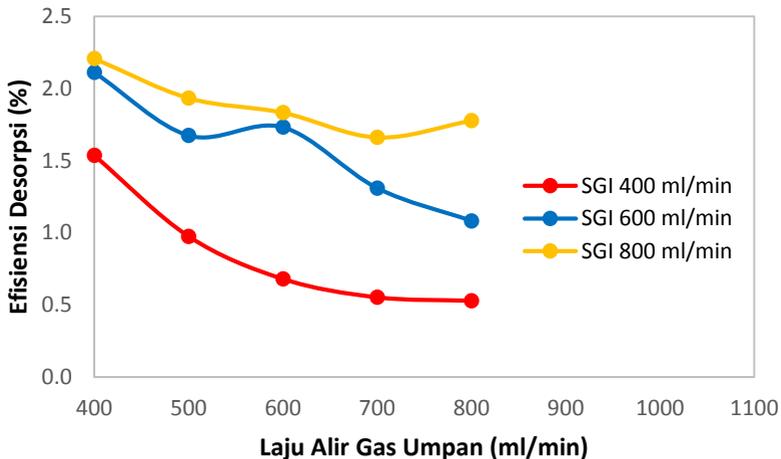


Gambar IV.13 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Desorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% dengan Pendekatan Statistik



Gambar IV.14 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Desorpsi CO₂ pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (*SGI*) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 99,9% dengan Pendekatan Statistik

Seperti yang terlihat di **Gambar IV.13** dan **Gambar IV.14**, titik percobaan menyimpang cukup jauh dari grafik pendekatan statistik, terbukti dengan koefisien korelasinya yang kecil. Hal ini dapat disebabkan karena adanya faktor lain yang tidak diperhitungkan dalam pendekatan model statistik, faktor jumlah fiber membran misalnya. Seperti yang diketahui, semakin banyak fiber membran yang digunakan akan semakin meningkatkan luas kontak gas-liquid yang pada akhirnya dapat meningkatkan efisiensi pemisahan CO₂, termasuk efisiensi desorpsi.



Gambar IV.15 Pengaruh Laju Alir Gas Umpam terhadap Efisiensi Desorpsi CO_2 pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO_2 40% Hasil Percobaan Eksperimental

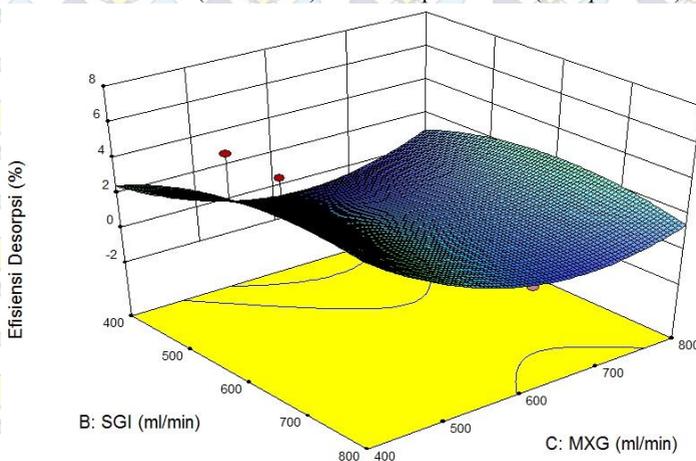
Gambar IV.13 dan **Gambar IV.14** menunjukkan grafik efisiensi desorpsi CO_2 pada berbagai laju alir gas umpam dan sweep gas. Seperti yang terlihat pada grafik, konsentrasi gas CO_2 cenderung tidak berpengaruh terhadap efisiensi desorpsi.

Untuk laju alir sweep gas yang sama, semakin besar laju alir gas umpam harusnya semakin kecil efisiensi desorpsi. Hal ini karena pada laju alir gas umpam yang semakin besar, waktu tinggal gas dalam kontaktor membran semakin singkat (Lv dkk., 2011). Waktu tinggal yang singkat mengakibatkan CO_2 yang terserap ke dalam pelarut kurang maksimal sehingga jumlah CO_2 dalam pelarut semakin kecil. Semakin kecilnya jumlah CO_2 dalam pelarut berakibat pada semakin kecilnya fluks desorpsi karena jumlah CO_2 yang ingin didesorp semakin kecil pula. Hasil titik-titik percobaan untuk konsentrasi CO_2 40% menunjukkan hal yang sama dengan teori dimana semakin besar laju alir gas umpam, efisiensi desorpsi semakin kecil. Namun, hasil dari pendekatan statistik tidak

menunjukkan kesesuaian dengan teori, baik untuk konsentrasi gas CO₂ 40% maupun 99,9%. Tren efisiensi desorpsi turun menuju titik minimal kemudian berangsur naik membentuk kurva U.

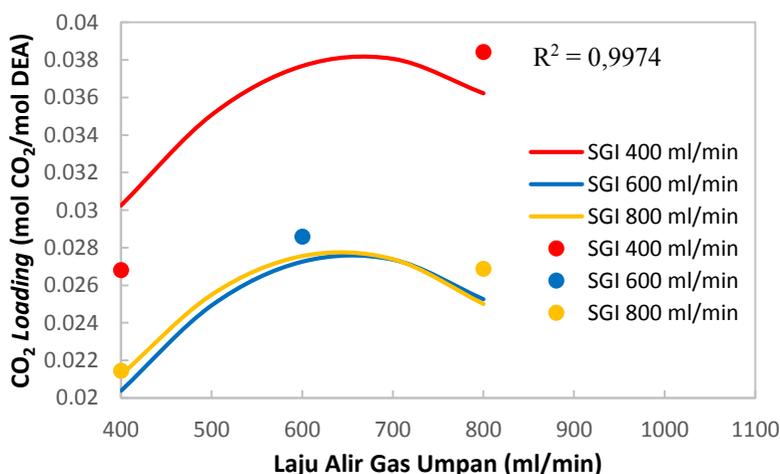
Untuk laju alir gas umpan yang sama, seharusnya semakin besar laju alir *sweep gas*, maka efisiensi desorpsi akan semakin kecil. Seperti pada efisiensi absorpsi, pada laju alir *sweep gas* yang semakin cepat, waktu tinggal *sweep gas* dalam membran akan semakin singkat sehingga mengurangi waktu kontak gas dengan kontakor membran. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan Lv dkk. (2011) yang menjelaskan pada kenaikan laju alir gas, waktu tinggal gas di dalam kontakor membran semakin singkat. Waktu tinggal yang singkat menyebabkan laju difusi CO₂ melalui pori-pori membran fiber menurun sehingga menyebabkan menurunnya nilai efisiensi desorpsi CO₂. Hasil percobaan efisiensi desorpsi untuk konsentrasi gas CO₂ 99,9% cukup sesuai dengan teori. Namun, untuk konsentrasi gas CO₂ 40% terjadi penyimpangan walau tidak signifikan. Seharusnya grafik untuk laju alir *sweep gas in* 600 ml/min (warna biru) berada di antara grafik jingga dan merah.

- MXG (*Mixed Gas*) = Gas Umpan - SGI (*Sweep Gas In*)



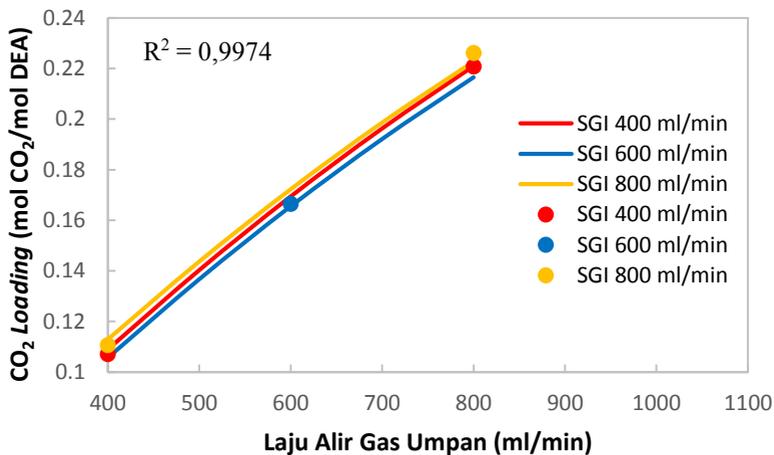
Gambar IV.16 *Response Surface* Efisiensi Desorpsi

Seperti yang terlihat di **Gambar IV.16**, secara keseluruhan, untuk laju alir *sweep gas* yang sama, efisiensi desorpsi turun kemudian naik sering dengan naiknya laju alir gas umpan. Ini terlihat dengan permukaan grafik yang turun kemudian naik saat laju alir gas umpan semakin besar. Untuk laju alir gas umpan yang sama, efisiensi desorpsi naik kemudian turun seiring dengan naiknya laju alir *sweep gas*. Ini terlihat dengan permukaan grafik yang naik kemudian turun saat laju alir *sweep gas* semakin besar.

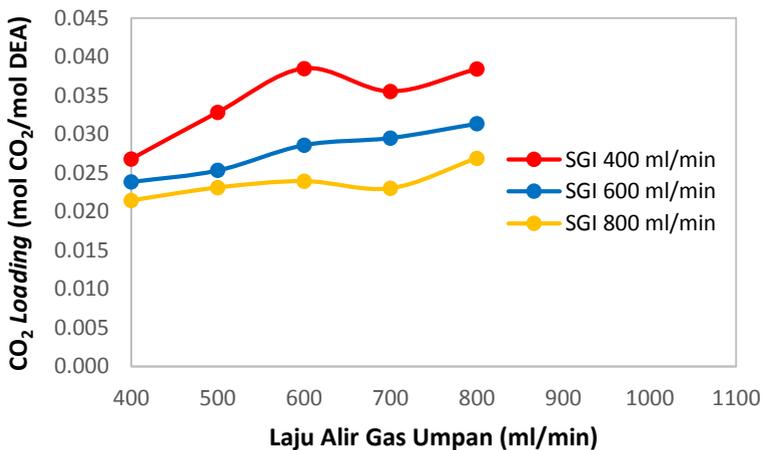


Gambar IV.17 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO₂ Loading pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% dengan Pendekatan Statistik

Titik-titik percobaan pada grafik di **Gambar IV.17** dan **Gambar IV.18** sudah dapat mewakili hasil keseluruhan. Hal ini terbukti dengan nilai koefisien korelasi yang mendekati 1.



Gambar IV.18 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO₂ Loading pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 99,9% dengan Pendekatan Statististik



Gambar IV.19 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO₂ Loading pada Berbagai Laju Alir Sweep Gas In (SGI) untuk Konsentrasi Gas CO₂ 40% dari Percobaan Eksperimental

Gambar IV.17 dan **Gambar IV.18** menunjukkan grafik CO_2 loading pelarut DEA pada berbagai laju alir gas umpan dan *sweep gas*. CO_2 loading adalah jumlah mol CO_2 yang terdapat dalam satu mol pelarut. Seperti yang terlihat pada grafik, semakin besar konsentrasi gas CO_2 , semakin besar CO_2 loading. Konsentrasi CO_2 yang semakin besar akan membuat perbedaan konsentrasi semakin besar sehingga CO_2 dapat dengan cepat berdifusi ke dalam pelarut DEA. Jumlah CO_2 yang besar dalam pelarut akan meningkatkan nilai CO_2 loading.

Untuk laju alir *sweep gas* yang sama, semakin besar laju alir gas umpan, maka akan semakin besar fluks absorpsi (Lv dkk., 2011). Semakin besar fluks absorpsi berarti semakin banyak CO_2 yang diserap oleh pelarut sehingga memperbesar CO_2 loading.

Reaksi *overall* antara CO_2 -DEA dapat dituliskan sebagai berikut.

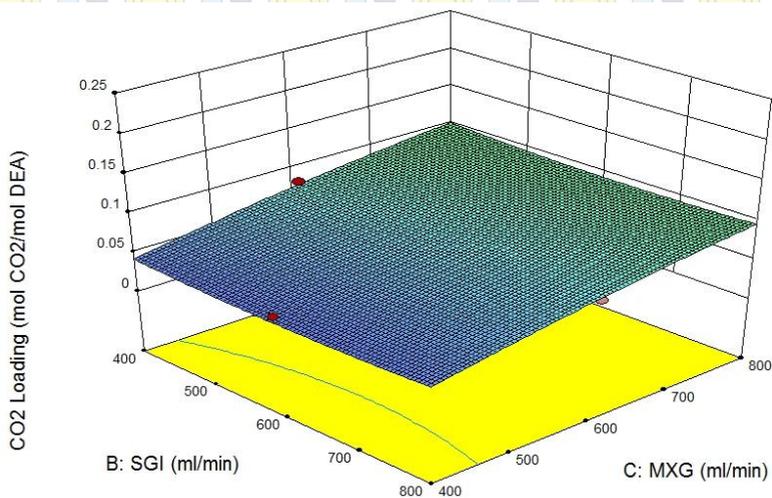


Dari reaksi tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa CO_2 loading maksimal dari pelarut DEA adalah 1 mol CO_2 per 2 mol DEA, atau 0,5 mol CO_2 /mol DEA (Chakma dkk., 1990). Sedangkan dari grafik pada **Gambar IV.17** dan **Gambar IV.18**, CO_2 loading yang paling tinggi hanya tercatat sekitar 0,22 mol CO_2 /mol DEA. Ini mengindikasikan bahwa penyerapan CO_2 oleh pelarut kurang maksimal. Hal ini dapat disebabkan oleh fiber membran yang mengalami pembasahan. Fenomena pembasahan yang terjadi dapat membuat pori-pori membran tertutup larutan sehingga hambatan total sistem bertambah (Dindore dkk., 2004). Bertambahnya hambatan ini berpengaruh pada rendahnya difusi gas melewati pori membran untuk sampai ke pelarut.

Untuk laju alir gas umpan yang sama, CO_2 loading pada kedua konsentrasi menunjukkan hasil yang cukup berbeda. Harusnya semakin kecil laju alir *sweep gas*, semakin kecil CO_2 loading. Hal ini karena laju alir *sweep gas* yang kecil memiliki waktu tinggal yang lebih lama di dalam kontaktor membran (Lv dkk., 2011) sehingga CO_2 yang ada dalam pelarut dapat ditarik keluar dengan optimal. Penarikan CO_2 yang optimal dari pelarut

akan mengakibatkan jumlah CO₂ dalam pelarut semakin sedikit sehingga CO₂ loading pun menjadi kecil. Teori ini tidak sesuai untuk konsentrasi gas CO₂ 40%, baik dari hasil percobaan maupun dari pendekatan statistik. Sedangkan untuk konsentrasi gas CO₂ 99,9%, laju alir *sweep gas* tidak terlalu berpengaruh terhadap besar CO₂ loading.

- MXG (*Mixed Gas*) = Gas Umpan - SGI (*Sweep Gas In*)



Gambar IV.20 Response Surface CO₂ Loading

Seperti yang terlihat di **Gambar IV.20**, secara keseluruhan, untuk laju alir *sweep gas* yang sama, CO₂ loading naik seiring dengan naiknya laju alir gas umpan. Ini terlihat dengan semakin naiknya permukaan grafik saat laju alir gas umpan semakin besar. Untuk laju alir gas umpan yang sama, laju alir *sweep gas* tidak terlalu berpengaruh terhadap besar CO₂ loading. Ini terlihat pada berbagai laju alir *sweep gas*, permukaan grafik cenderung rata.

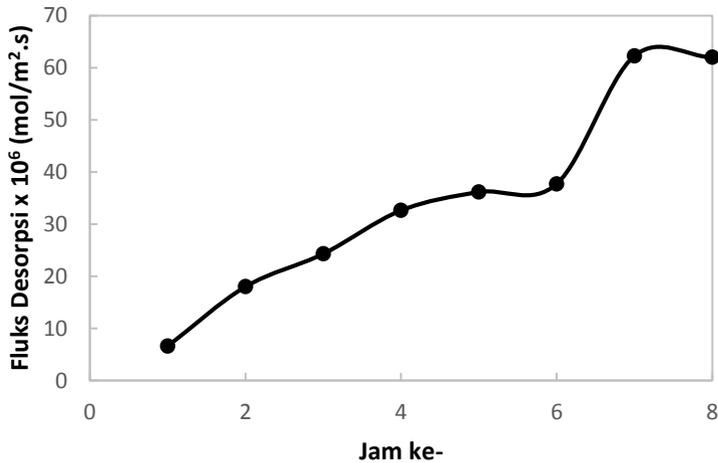
Dari seluruh grafik yang telah disajikan di atas dapat disimpulkan bahwa proses absorpsi dalam membran terjadi lebih baik daripada proses desorpsi. Hal ini ditunjukkan dengan koefisien korelasi yang mendekati satu, sedangkan untuk proses

desorpsi (fluks dan efisiensi desorpsi) koefisien korelasinya kecil sehingga belum bisa menjelaskan tren grafik hasil percobaan. Buruknya performa desorpsi ini dapat disebabkan karena CO₂ dalam larutan DEA telah bereaksi menjadi bentuk lain yang sulit untuk ditarik masuk ke dalam *sweep gas* (Chakma dkk, 1990). Selain itu, jumlah fiber membran untuk proses desorpsi kurang banyak sehingga sulit untuk mengimbangi besar fluks absorpsi. Jumlah fiber membran desorpsi seyogyanya lebih banyak 10-100 kali jumlah fiber membran absorpsi agar besar fluks keduanya berimbang seperti yang dilakukan pada penelitian Kumazawa (2000) dan Shimada dkk. (2006).

Kelebihan penelitian ini jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu dimana proses absorpsi dan desorpsi juga terjadi secara simultan dalam satu modul adalah fluks absorpsi yang cukup besar hingga mencapai $2,306 \times 10^{-3}$ mol/m².s. Sebagai perbandingan, penelitian yang dilakukan oleh Shimada dkk. (2006) menghasilkan fluks absorpsi maksimal sebesar 1×10^{-3} mol/m².s, sedangkan penelitian Mansourizadeh dkk. (2011) menghasilkan fluks absorpsi maksimal sebesar $8,5 \times 10^{-4}$ mol/m².s. Walaupun dari hasil percobaan fluks desorpsi terlihat kurang maksimal, namun jika dibandingkan dengan penelitian Shimada dkk. (2006) dan Mansourizadeh dkk. (2011), fluks desorpsi penelitian ini jauh lebih baik. Fluks desorpsi pada penelitian ini mencapai $4,5 \times 10^{-5}$ mol/m².s, sedangkan pada penelitian Shimada dkk. (2006) sebesar 1×10^{-5} dan pada penelitian Mansourizadeh dkk. (2011) hanya 3×10^{-8} mol/m².s. Selain itu, luas permukaan kontak gas-liquid pada penelitian ini jauh lebih besar dibanding luas permukaan kontak pada kedua penelitian yang disebutkan sebelumnya, dengan catatan dimensi alat yang digunakan hampir sama. Pada penelitian Shimada dkk. (2006), luas kontak gas-liquid sebesar 754 cm², pada penelitian Mansourizadeh dkk. (2011) hanya 240 cm², sedangkan luas kontak gas-liquid pada penelitian ini mencapai 2.119 cm². Luas kontak yang besar inilah yang menghasilkan laju perpindahan massa yang besar pula.

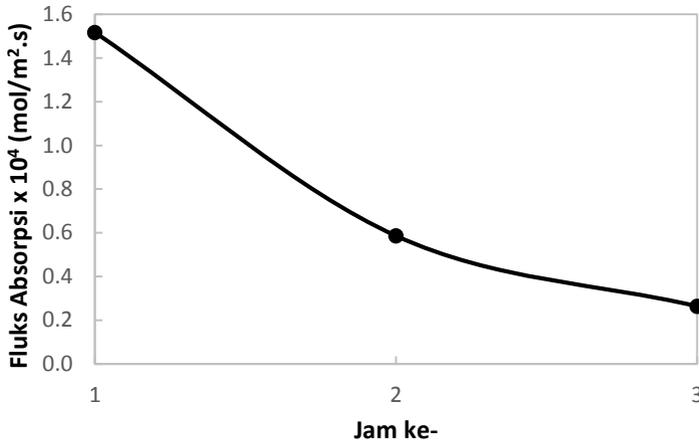
IV.2 Uji Kinerja

Variabel yang digunakan untuk uji kinerja adalah variabel optimal yang diperoleh dari uji pengaruh parameter operasi. Variabel optimal ini merupakan rekomendasi dari DesignExpert® 9 dari berbagai hasil variabel respon terhadap variabel berubah. Variabel optimal tersebut adalah laju alir gas umpan 800 ml/min dan laju alir *sweep gas in* 400 ml/min. Untuk konsentrasi gas CO₂ dipilih konsentrasi 40% karena mewakili konsentrasi CO₂ dalam gas alam. Uji kinerja dilakukan selama 8 jam *non-stop* untuk mengetahui performa kontaktor membran yang diukur berdasarkan fluks absorpsi dan desorpsi serta efisiensi absorpsi dan desorpsi.



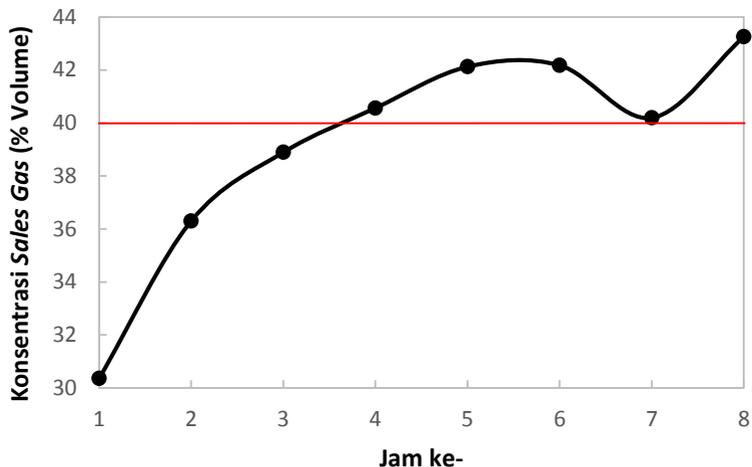
Gambar IV.21 Fluks Desorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO₂ 40%

Dari Gambar IV.21 dapat dilihat bahwa fluks desorpsi semakin lama semakin meningkat. Hal ini dapat disebabkan karena pelarut sudah semakin jenuh dengan CO₂ sehingga dengan adanya perbedaan konsentrasi CO₂ yang besar, CO₂ dalam pelarut semakin banyak yang berdifusi ke dalam *sweep gas*.



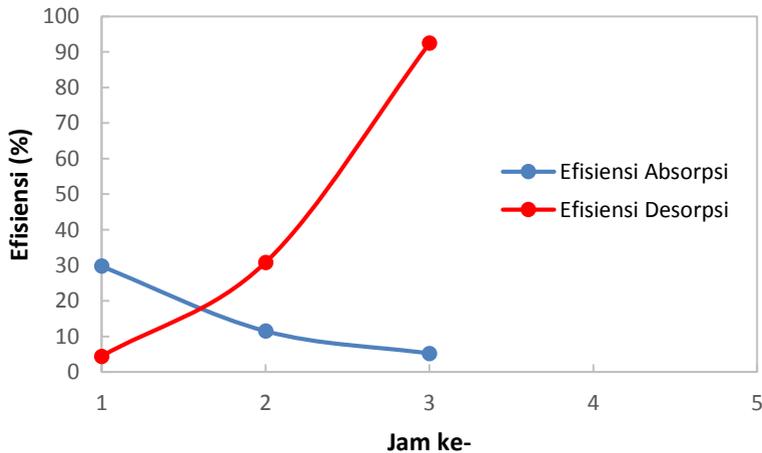
Gambar IV.22 Fluks Absorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO₂ 40%

Pada tiga jam pertama uji kinerja, fluks absorpsi semakin lama semakin menurun. Hal ini dapat disebabkan karena pelarut yang mulai jenuh sehingga kemampuan mengabsorpsi CO₂ juga menurun. Setelah tiga jam uji kinerja, performa kontaktor membran untuk absorpsi sudah mencapai titik minimal. Seperti yang terlihat pada **Gambar IV.23**, konsentrasi *sales gas* yang keluar kontaktor lebih besar dari konsentrasi gas CO₂ masuk (ditandai dengan garis lurus merah pada grafik). Ini menandakan bahwa fungsi absorpsi pada kontaktor membran sudah tidak lagi berjalan. Konsentrasi CO₂ dalam *sales gas* yang lebih besar dari konsentrasi CO₂ masuk dapat disebabkan adanya gas CO₂ yang terperangkap dalam membran yang terdorong keluar. Gas CO₂ yang terperangkap dalam membran mengindikasikan bahwa gas tersebut tidak terabsorpsi ke dalam pelarut. Tidak terabsorpsinya CO₂ dalam pelarut dapat disebabkan oleh pelarut yang mulai jenuh atau permukaan membran yang sudah mengalami pembasahan yang mengakibatkan pori-pori membran tertutup (Dindore dkk., 2004).



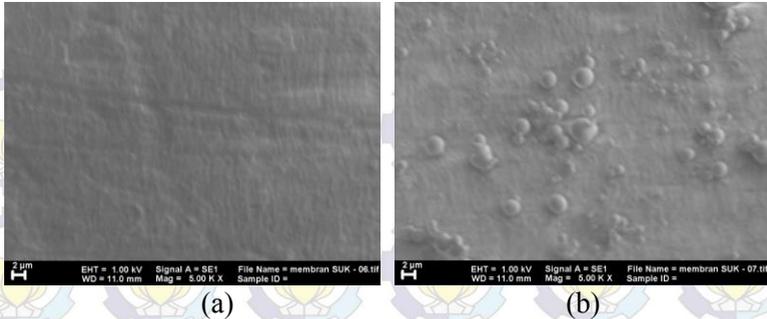
Gambar IV.23 Konsentrasi CO_2 dalam *Sales Gas* Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO_2 40%

Efisiensi absorpsi dan desorpsi menunjukkan tren yang sama dengan fluks absorpsi dan desorpsi. Semakin lama uji kinerja, efisiensi absorpsi semakin turun dan efisiensi desorpsi semakin naik. Efisiensi absorpsi yang menurun dapat disebabkan karena pelarut sudah tidak lagi mampu menyerap CO_2 dan permukaan membran yang telah mengalami pembasahan. Efisiensi desorpsi yang semakin naik karena pelarut sudah semakin jenuh dengan CO_2 sehingga dengan adanya perbedaan konsentrasi CO_2 yang besar, jumlah CO_2 dalam pelarut yang berdifusi ke dalam *sweep gas* semakin banyak.



Gambar IV.24 Efisiensi Absorpsi dan Desorpsi Setiap Jam untuk Laju Alir Gas Umpan 800 ml/min dan Laju Alir *Sweep Gas In* 400 ml/min pada Konsentrasi Gas CO₂ 40%

Pengaruh waktu kontak antara pelarut dan permukaan membran menyebabkan perubahan morfologi membran akibat terjadi pembasahan membran dapat diamati dari hasil analisa SEM seperti disajikan dalam **Gambar IV.25**. Hasil menunjukkan perbedaan kekasaran dan perubahan ukuran pori membran. Perubahan tersebut akibat adanya intrusi pelarut ke dalam pori membran dan memperbesar pori membran. Intrusi pelarut tersebut karena adanya gaya lateral pada dinding pori menyebabkan bergesernya dinding. Pergeseran dinding pori yang berukuran lebih besar menyebabkan pori lebih kecil akan menurun dan memungkinkan tertutup (Dindore dkk., 2004). Adanya pelarut dalam pori membran menyebabkan hambatan total pada sistem membesar sehingga laju perpindahan massa menjadi kecil (Qi & Cussler, 1985).



Gambar IV.25 Hasil SEM Permukaan Membran PP (a) sebelum perendaman; (b) setelah perendaman

Selama percobaan, pembasahan pada membran dapat diidentifikasi dengan adanya cairan (pelarut) yang mengembun di sepanjang selang gas seperti yang terlihat pada **Gambar IV.26**. Adanya pelarut di sepanjang selang gas mengindikasikan bahwa sifat hidrofobisitas membran sudah menurun sehingga pelarut dapat mengintrusi masuk ke dalam pori-pori membran. Pelarut yang mengintrusi masuk ke pori membran akan terbawa oleh gas yang melewati lumen membran.



Gambar IV.26 Pelarut yang Terbawa oleh Aliran Gas

Pembasahan membran dapat dicegah dengan menjalankan kontaktor membran pada tekanan operasi pada sisi pelarut lebih rendah dibanding tekanan minimum cairan. Selain itu, ada beberapa hal yang juga dapat dipertimbangkan, yaitu (Li & Chen, 2005):

1. Menggunakan membran hidrofobik agar membran lebih tahan terhadap pembasahan oleh pelarut.
2. Modifikasi permukaan membran untuk meningkatkan hidrofobisitas membran.
3. Membran komposit, yaitu membran dengan lapisan atas tidak berpori dan lapisan berikutnya mikroporos yang efektif mencegah pembasahan.
4. Memilih membran *hollow fiber* yang lebih tidak berpori (*dense*) karena lebih fleksibel dalam tekanan gas umpan.
5. Memilih pelarut dengan tegangan permukaan (*surface tension*) yang sesuai dimana tegangan permukaan rendah memudahkan pelarut menembus pori membran.
6. Optimisasi kondisi operasi untuk meningkatkan kinerja absorpsi keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

Atchariyawut, S., Feng, C., Wang, R., Jiratananon, R., Liang, D.T. (2006). "Effect of Membrane Structure on Mass Transfer in The Membrane Gas-Liquid Contacting Process Using Microporous PVDF Hollow Fibers." *Journal of Membrane Science*, **285**, 272-281.

Chakma, A., E. Chornet, R.P. Overend, W.H. Dawson (1990). "Absorption of CO₂ by Aqueous Diethanolamine (DEA) Solutions in a High Shear Jet Absorber." *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **68**.

Cooney, D.O., Jackson, C. C. (1989). "Gas Absorption in a Hollow Fiber Device". *Journal of Chemical Engineering Communications*, **79 (1)**, 153-163.

deMontigny, D., Tontiwachwuthikul, P., Chakma, A. (2006). "Using Polypropylene and Polytetrafluoroethylene Membranes in a Membrane Contactor for CO₂ Absorption." *Journal of Membrane Science*, **277**, 99-107.

Dindore, V.Y., Brillman, D.W.F., Geuzebroek, F.H., Versteeg, G.F. (2004). "Membrane-Solvent Selection for CO₂ Removal Using Membrane Gas-Liquid Contactors." *Journal of Separation and Purification Technology*, **40**, 133-145.

Feron, P.H.M. & Jansen, A.E. (1995). "Capture of Carbon Dioxide Using Membrane Gas Absorption and Reuse in the Horticultural Industry." *Journal of Energy Conversion and Management*, **36**, 411-414.

- Feron, P.H.M. & Jansen, A.E. (2002). "CO₂ Separation with Polyolefin Membrane Contactors and Dedicated Absorption Liquid: Performance and Prospects." *Separation and Purification Technology*, **27**, 231-242.
- Gabelman, A. & Hwang, S.T. (1999). "Hollow Fiber Membrane Contactors." *Journal of Membrane Science*, **159**, 61-106.
- Geankoplis, Christie J. 2003. *Transport Process and Separation Process Principles*. New Jersey: Prentice Hall.
- Guha, A.K., Majumdar, S., Sirkar, K.K. (1990). "Facilitated Transport of CO₂ Through an Immobilized Liquid Membrane of Aqueous Diethanolamine". *Industrial Engineering Chemical Research*, **29**, 2093-2100.
- Hedayat, M., Mohammad S., Seyyed A.M. (2011). "Simultaneous Separation of H₂S dan CO₂ Fom Natural Gas by Hollow Fiber Membrane Contactor Using Mixture of Alkanolamines." *Journal of Membrane Science*, **377**, 191-197.
- Karoor, S. & Sirkar, K.K (1993). "Gas Absorption Studies in Microporous Hollow Fiber Membrane Modules." *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **32**, 674-681.
- Kartohardjono, S., Anggara, Subihi, Yuliusman (2007). "Absorpsi CO₂ dari Campurannya dengan CH₄ dan N₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Pelarut Air." Jakarta: Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.

Khaisri, S., deMontigny, D., Tontiwachwuthikul, P., Jiraratananon, R. (2011). "CO₂ Stripping from Monoethanolamine Using a Membrane Contactor." *Journal of Membrane Science*, **376**, 110-118.

Kidnay, Arthur J. 2006. *Fundamentals of Natural Gas Processing*. New York: CRC Press.

Kim, Y.S. & Yang, S.M. (2000). "Absorption of Carbon Dioxide Through Hollow Fiber Membranes Using Various Aqueous Absorbents." *Journal of Separation and Purification Technology*, **21**, 101-109.

Kohl, Arthur & Richard Nielsen. 1997. *Gas Purification*. Texas: Gulf Publishing.

Kosaraju P., Kovvali, A.S., Korikov, A., Sirkar, K.K. (2005). "Hollow Fiber Membrane Contactor Based CO₂ Absorption-Stripping Using Novel Solvents and Membranes." *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **44**, 1250-1258.

Kreulen, H., Smolders, C.A., Versteeg, G.F. van Swaaij, W.P.M. (1993). "Determination of Mass Transfer Rates in Wetted and Non Wetted Microporous Membranes." *Journal of Chemical Engineering Science*, **48**, 2093-2102.

Kumar, P.S., Hogendoorn, J.A., Feron, P.H.M., Versteeg, G.F. (2002). "New Absorption Liquids for the Removal of CO₂ from Dilute Gas Streams Using Membrane Contactor." *Journal of Chemical Engineering Science*, **57**, 1639-1651.

Kumazawa, H. (2000). "Absorption and Desorption of CO₂ by Aqueous Solution of Sterically Hindered 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol in Hydrophobic Microporous Hollow Fiber Contained Contactors." *Journal of Chemical Engineering Science*, **55**, 5531-5543.

Li, J.L. & Chen, B.H. (2005). "Review of CO₂ Absorption Using Chemical Solvents in Hollow Fiber Membrane Contactors." *Journal of Separation and Purification Technology* **41**, 109–122.

lv, Y., Xinhai Y., Shan-Tung T., Jinyue Y., Erik D. (2011). "Experimental Studies on Simultaneous Removal of CO₂ and SO₂ in a Polypropylene Hollow Fiber Membrane Contactor." *Journal of Applied Energy*.

Majumdar, S., Guha, A.K., Sirkar, K.K., (1988). "A New Liquid Membrane Technique for Gas Separation." *A.I.Ch.E. Journal*, **34**, 1135–1145.

Mansourizadeh, A. & Ismail, A.F. (2009). "Hollow Fiber Gas-Liquid Membrane Contactors for Acid Gas Capture: Review." *Journal of Hazardous Materials*, **171**, 38-53.

Mansourizadeh, Amir (2011). "Experimental Study of CO₂ Absorption/Stripping via PVDF Hollow Fiber Membrane Contactor." *Journal of Chemical Engineering Research and Design*, **273**, 386-390.

Mansourizadeh, A. & Ismail, A.F. (2011). "CO₂ Stripping from Water Through Porous PVDF Hollow Fiber Membrane Contactor." *Journal of Desalination*, **273**, 386-390.

Matsumoto, H., Kitamura, H., Kamata, T., Ishibashi, M., Ota, H. (1995). "Effect of Membrane Properties of Microporous Hollow Fiber Gas-Liquid Contactor on CO₂ Removal from Thermal Power Plant Flue Gas." *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **28**, 125-128.

Mulder, M. 1996. *Basic Principles of Membrane Technology* 2nd Ed. Dordrecht: Kluwer Academic.

Nii, S., Iwata, Y., Takahashi, K., Takeuchi, H. (1995). "Regeneration of CO₂-Loaded Carbonate Solution by Reducing Pressure." *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **28**, 148-153.

Nishikawa, N., Ishibashi, M., Ohta, H., Akutsu, N., Matsumoto, H., Kamata, T., Kitamura, H. (1995). "CO₂ Removal by Hollow Fiber Gas-Liquid Contactors." *Journal of Energy Conversion and Management*, **36**, 415-418.

Perry, Robert H. & Don W. Green. 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. New York: McGraw-Hill.

Qi, Z. & Cussler, E.L. (1985). "Microporous Hollow Fibers For Gas Absorption Mass Transfer in the Liquid." *Journal of Membrane science*, **23**, 321-332.

Rahmawati, Y. 2014. *Kontaktor Membran Hollow Fiber Menyalang Ganda untuk Absorpsi dan Desorpsi CO₂*. Bandung: Jurusan Teknik Kimia Institut Teknologi Bandung.

Rangwala, H.A. (1996). "Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Solutions Using Hollow Fiber Membrane Contactors." *Journal of Membrane Science*, **112**, 229-240.



Shimada, K., Seekkuarachchi, I.N., Kumazawa, H. (2006).
“Absorption of CO₂ into Aqueous Solutions of Sterically
Hindered Methyl Aminoethanol Using a Hydrophobic
Microporous Hollow Fiber Contained Contactor.”
Chemical Engineering Communication, **193**, 38-54.

Wang, K.L. & Cussler, E.L. (1993). “Baffled Membrane Modules
Made with Hollow Fiber Fabric.” *Journal of Membrane
Science*, **85**, 265-278.

Wang, S., Hawboldt, K., Abdi, M.A. (2006). “Novel Dual-
Membrane Gas-Liquid Contactors: Modelling and
Concept Analysis.” *Industrial and Engineering
Chemistry Research*, **45**, 7882-7891.

Yan, S.P., Fang, M.X., Zhang, W.F., Wang, S.Y., Luo, Z.Y., Cen,
K.F. (2007). “Experimental Study on the Separation of
CO₂ from Flue Gas Using Hollow Fiber Membrane
Contactors without Wetting.” *Journal of Fuel Processing
Technology*, **88**, 501-511.

Yeon, S.H., Sea, B., Park Y.I., Lee, K.S., Lee, K.H. (2004).
“Absorption of Carbon Dioxide Characterized by Using
the Absorbent Composed of Piperazine and
Triethanolamine.” *Journal of Separation Science and
Technology*, **39**, 3281-3300.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Fluks absorpsi tertinggi mencapai $2,306 \times 10^{-3}$ mol/m².s.

Pengaruh parameter operasi terhadap fluks absorpsi:

- fluks absorpsi semakin besar jika konsentrasi gas CO₂ semakin besar.
- fluks absorpsi semakin besar jika laju alir gas CO₂ (gas umpan) semakin besar,
- laju alir *sweep gas* cenderung tidak berpengaruh terhadap besar fluks absorpsi.

Fluks desorpsi tertinggi mencapai $4,536 \times 10^{-5}$ mol/m².s.

Pengaruh parameter operasi terhadap fluks desorpsi:

- fluks desorpsi semakin besar jika konsentrasi gas CO₂ semakin besar,
- fluks desorpsi semakin besar jika laju alir gas CO₂ (gas umpan) semakin kecil,
- fluks desorpsi semakin besar jika laju alir *sweep gas* semakin besar.

Efisiensi absorpsi tertinggi mencapai 83,747%. Pengaruh parameter operasi terhadap efisiensi absorpsi:

- efisiensi absorpsi semakin besar jika konsentrasi gas CO₂ semakin besar,
- efisiensi absorpsi semakin besar jika laju alir gas CO₂ (gas umpan) semakin kecil,
- efisiensi absorpsi semakin besar jika laju alir *sweep gas* semakin kecil.

Efisiensi desorpsi tertinggi 4,873%. Pengaruh parameter operasi terhadap efisiensi desorpsi:

- konsentrasi gas CO₂ cenderung tidak berpengaruh terhadap besar efisiensi desorpsi,

- semakin besar laju alir gas CO₂ (gas umpan), efisiensi desorpsi turun kemudian naik,
- semakin besar laju alir *sweep gas*, efisiensi desorpsi naik kemudian turun.

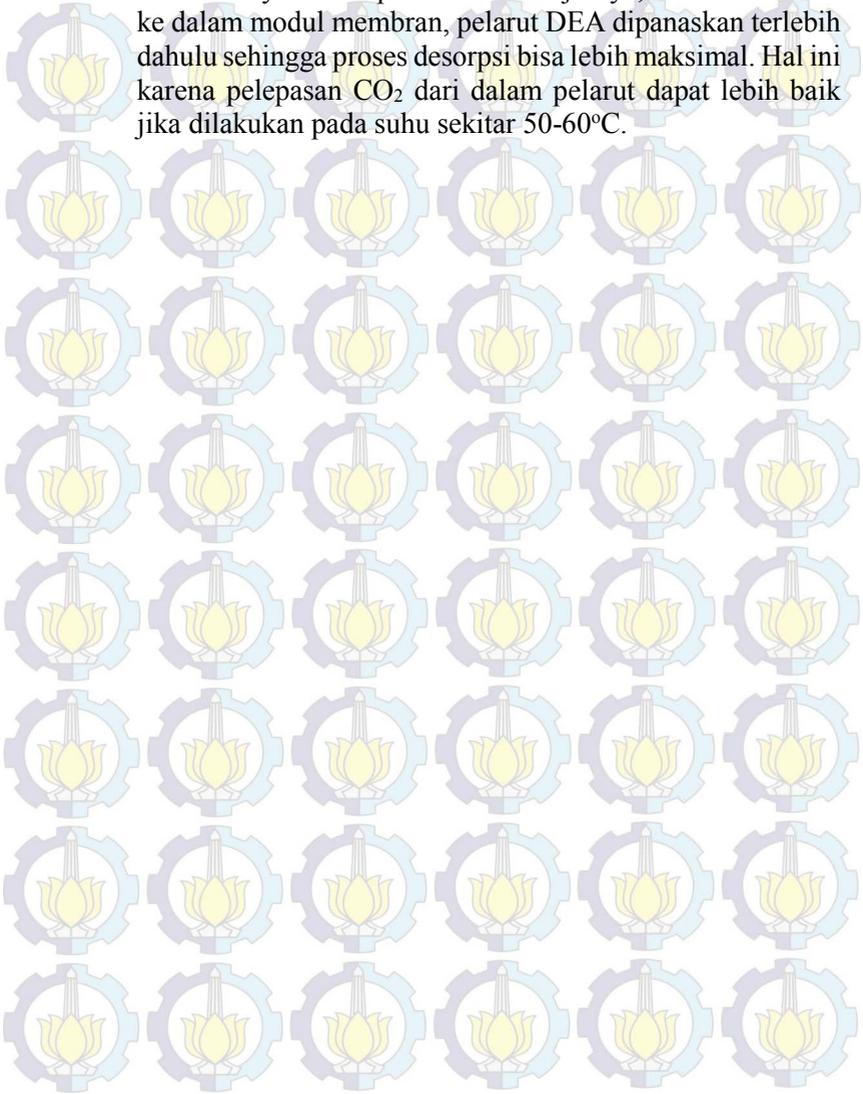
2. Uji kinerja:

- Selama tiga jam pertama, fluks absorpsi semakin turun hingga $2,63 \times 10^{-5}$ mol/m².s. Lebih dari tiga jam, fungsi absorpsi dari membran sudah tidak bekerja dengan baik.
- Fluks desorpsi semakin naik setiap jam uji kinerja hingga mencapai $6,202 \times 10^{-5}$.
- Selama tiga jam pertama, efisiensi absorpsi semakin turun hingga 5,181%, sedangkan efisiensi desorpsi semakin naik hingga mencapai 92,437%. Lebih dari tiga jam, baik efisiensi absorpsi maupun efisiensi desorpsi sudah tidak berjalan dengan baik.
- Secara keseluruhan, kontaktor membran mampu menjalankan fungsi absorpsi dan desorpsi selama tiga jam uji kinerja.

V.2 Saran

1. Agar mendapat hasil yang maksimal saat uji kinerja, fiber membran harus dalam keadaan baru (belum pernah dipakai). Dengan demikian, harus dibuat dua modul membran, yang pertama untuk uji pengaruh parameter operasi, dan yang kedua untuk uji kinerja.
2. Sampel gas yang akan diuji sebaiknya dimasukkan ke dalam *gas holder*. Sebab, *plastic bag* yang digunakan rentan bocor sehingga membuat hasil analisa kurang tepat.
3. Untuk penelitian selanjutnya, pelarut DEA dicoba untuk disirkulasi untuk menghindari lamanya waktu perendaman membran yang dapat mengakibatkan membran cepat mengalami pembasahan.

4. Hasil penelitian ini untuk proses desorpsi masih kurang baik. Ada baiknya untuk penelitian selanjutnya, sebelum masuk ke dalam modul membran, pelarut DEA dipanaskan terlebih dahulu sehingga proses desorpsi bisa lebih maksimal. Hal ini karena pelepasan CO_2 dari dalam pelarut dapat lebih baik jika dilakukan pada suhu sekitar $50\text{-}60^\circ\text{C}$.





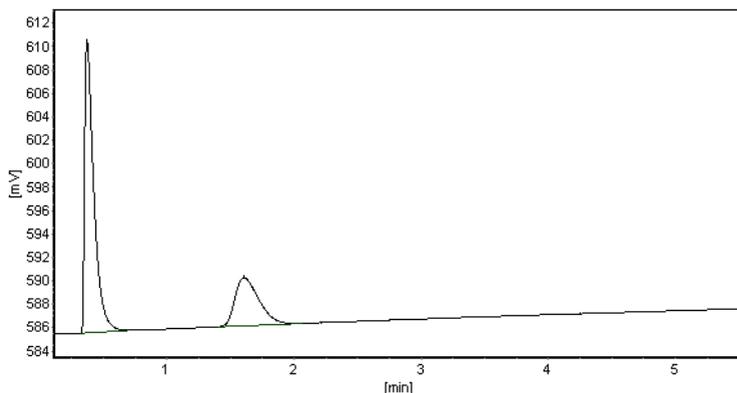
LAMPIRAN A

SLG-1

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-1
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.37	24937	125643	70.05237	BB
2	CO2	1.605	4112	53713	29.94763	BB
TOTAL			29049	179356	100	

SGO-1

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-1

Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

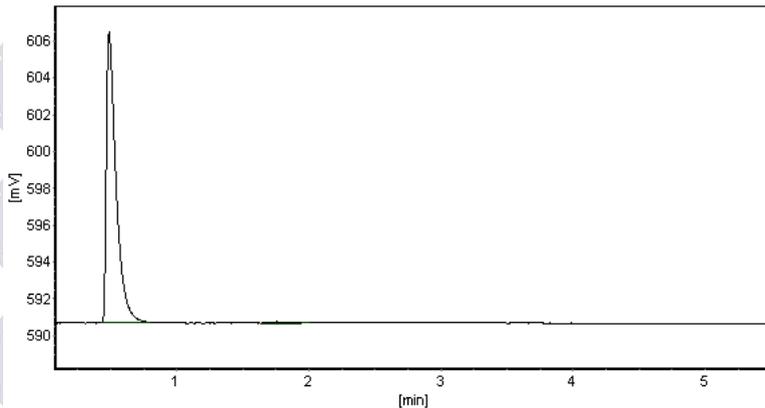
Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437

Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA

Inlet : CIP, Temp = 80 C

Coloumn : Porapak-Q

Oven : 43C (8 min)



General Result

No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.486	15750	80542	99.70922	BB
2	CO2	1.758	22	235	0.29078	BB
TOTAL			15772	80777	100	

SLG-2

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-2

Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

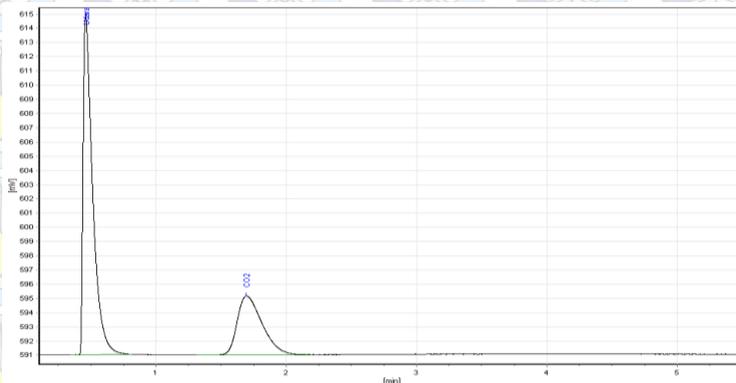
Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437

Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA

Inlet : CIP, Temp = 80 C

Coloumn : Porapak-Q

Oven : 43C (8 min)



General Result

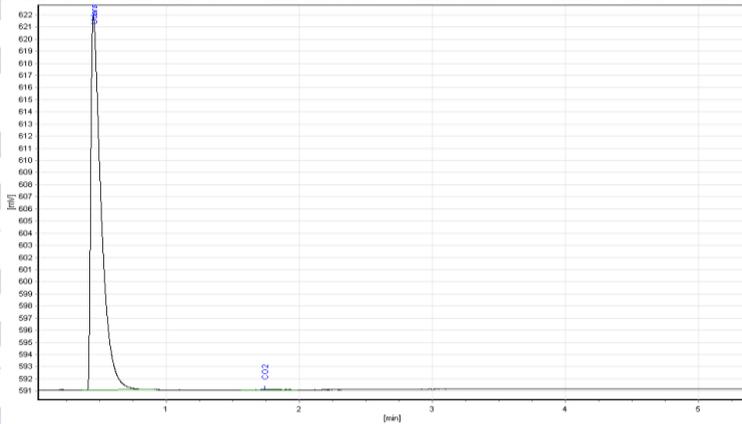
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.465	23637	122638	67.55073	BB
2	CO2	1.723	4237	56363	32.44927	BB
TOTAL			27874	179001	100	

SGO-2

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-2
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.476	31022	174847	99.78315	BB
2	CO2	1.765	29	378	0.21685	BB
TOTAL			31051	175227	100	

SLG-3

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-3

Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

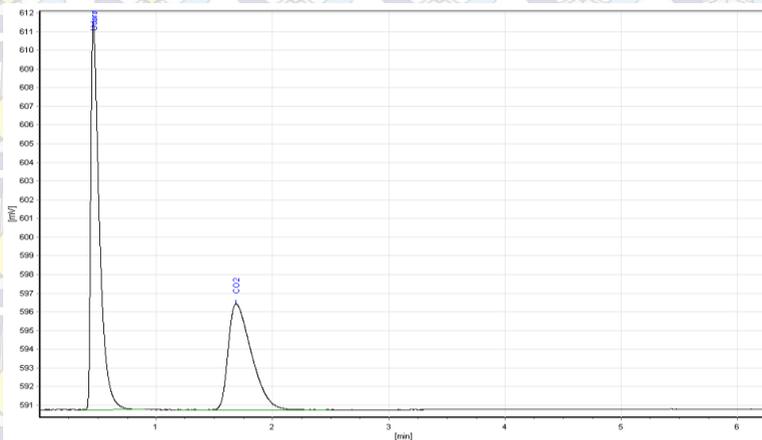
Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437

Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA

Inlet : CIP, Temp = 80 C

Coloumn : Porapak-Q

Oven : 43C (8 min)



General Result

No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.462	20769	107915	67.63353	BB
2	CO2	1.727	5334	69569	32.36647	BB
TOTAL			26103	177484	100	

SGO-3

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-3

Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

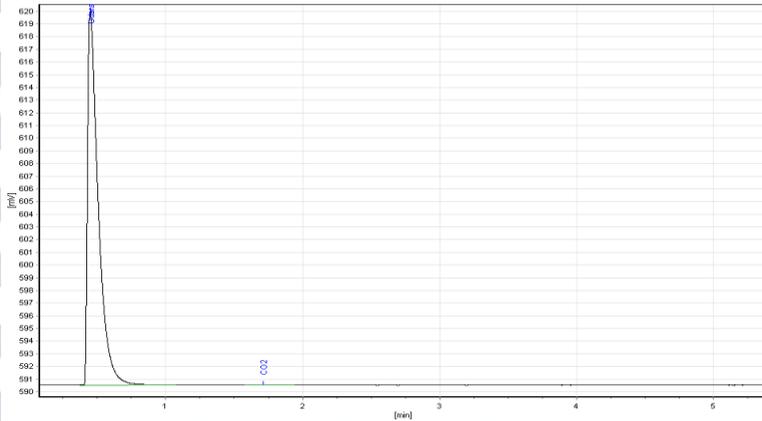
Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437

Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA

Inlet : CIP, Temp = 80 C

Coloumn : Porapak-Q

Oven : 43C (8 min)



General Result

No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.464	29720	172652	99,82315	BB
2	CO2	1.767	28	369	0.17685	BB
TOTAL			29748	173021	100	

SLG-4

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-4

Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

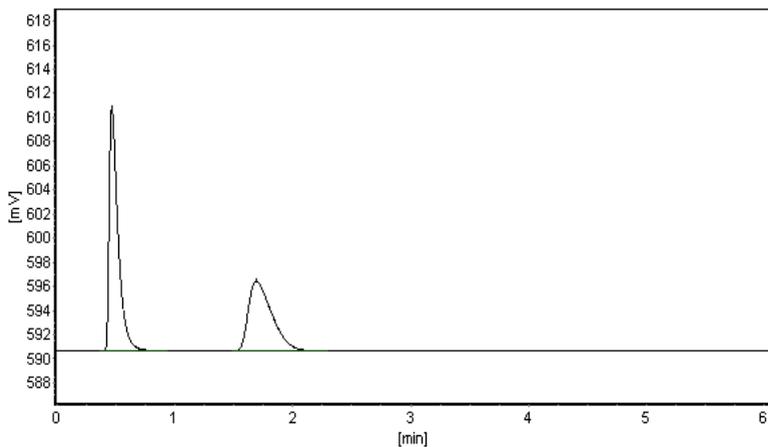
Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437

Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA

Inlet : CIP, Temp = 80 C

Coloumn : Porapak-Q

Oven : 43C (8 min)

**General Result**

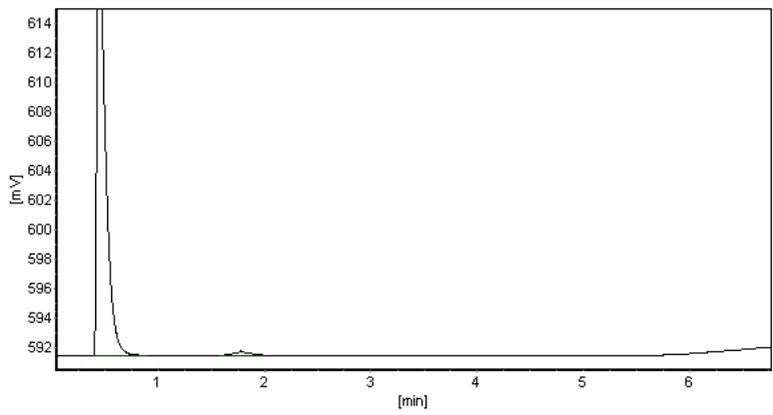
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.462	20261	109261	69.02363	BB
2	CO2	1.739	5388	67771	30.97637	BB
TOTAL			25649	177032	100	

SGO-4

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-4
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

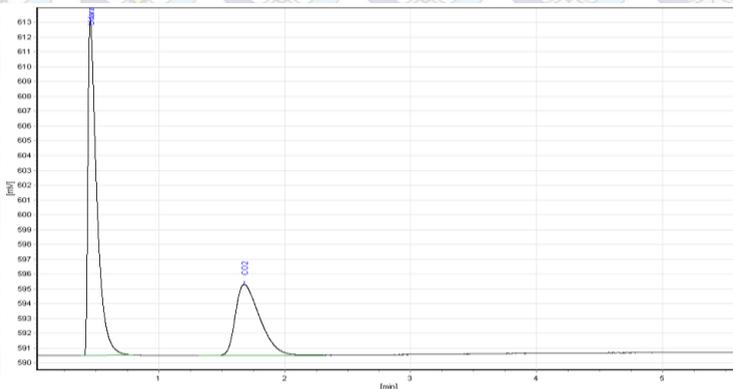
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.459	30388	173052	99.86746	BB
2	CO2	1.781	26	343	0.13254	BB
TOTAL			30414	173395	100	

SLG-5

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-5
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

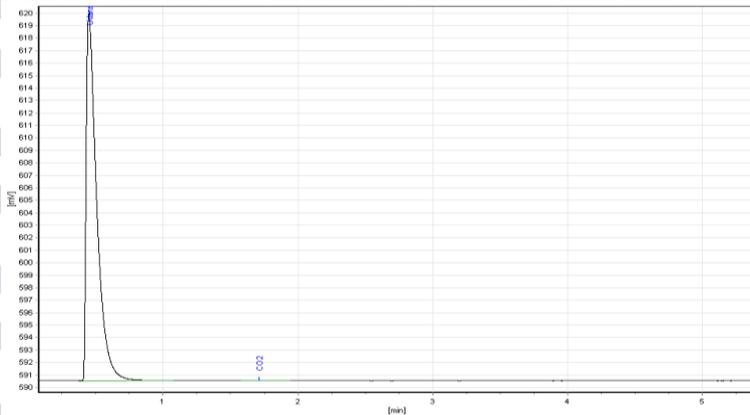
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.455	22599	111133	65.02669	BB
2	CO2	1.735	4756	64877	34.97331	BB
TOTAL			27355	176010	100	

SGO-5

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-5
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

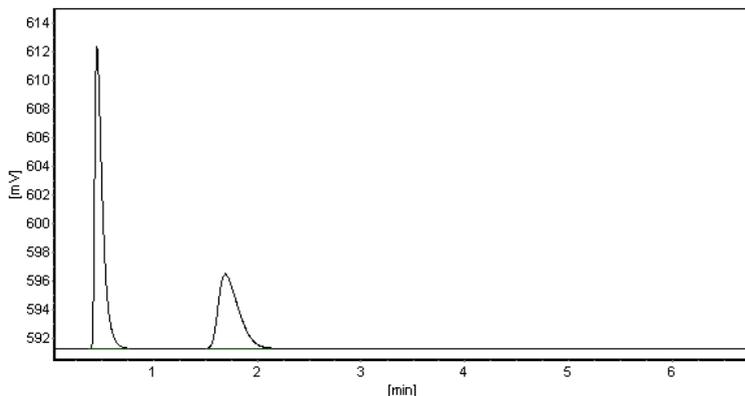
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.448	29449	160334	99.858	BB
2	CO2	1.773	21	228	0.142	BB
TOTAL			29470	160562	100	

SLG-6

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-6
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

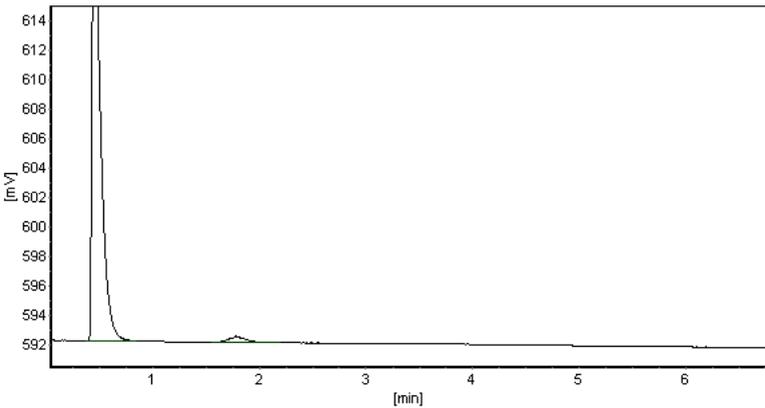
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.463	20672	111692	67.07041	BB
2	CO2	1.731	5539	69082	32.92959	BB
TOTAL			26211	180774	100	

SGO-6

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-6
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

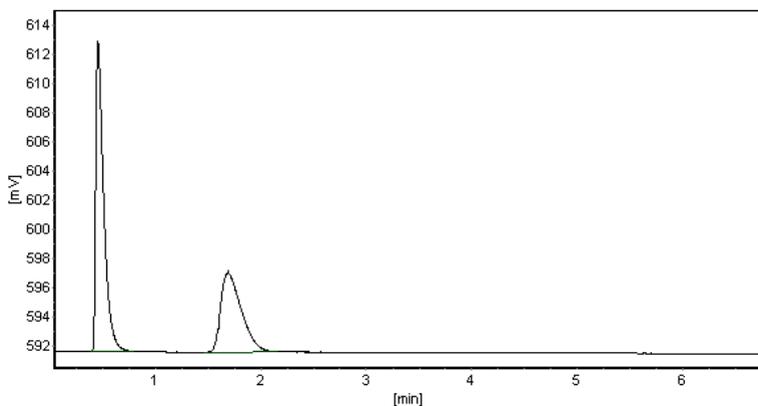
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.446	31208	174781	99.76544	BB
2	CO2	1.783	55	421	0.23456	BB
TOTAL			31263	175202	100	

SLG-7

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-7
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

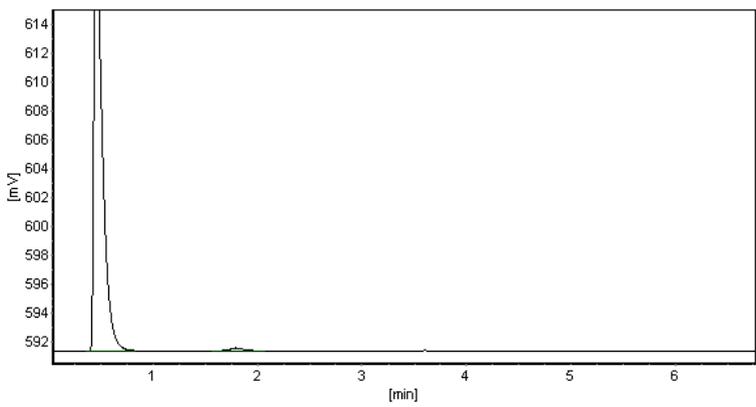
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.463	20388	10344	66.25221	BB
2	CO2	1.723	5842	68107	33.74779	BB
TOTAL			26230	171851	100	

SGO-7

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-7
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

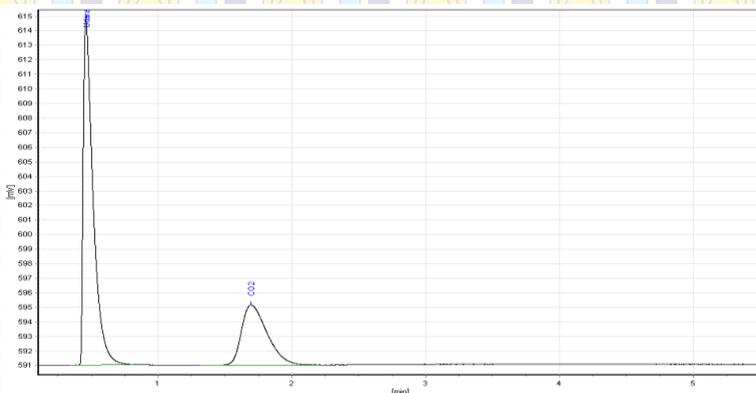
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.479	31038	173101	99.80326	BB
2	CO2	1.786	51	398	0.19674	BB
TOTAL			31089	173499	100	

SLG-8

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-8
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

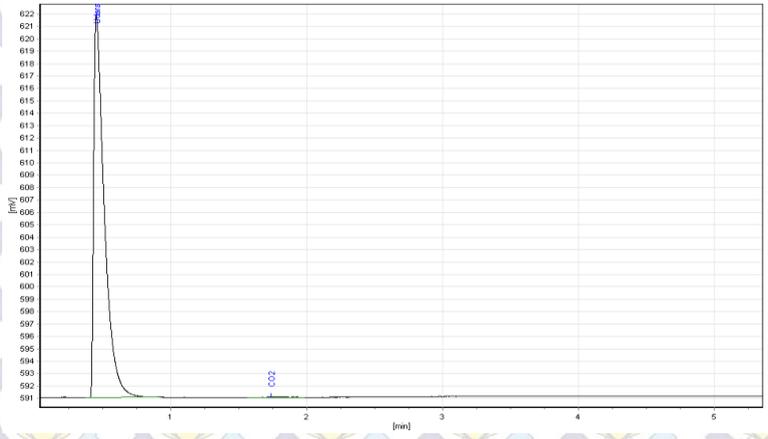
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.459	23794	121179	66.9428	BB
2	CO2	1.722	4179	54879	33.0572	BP
TOTAL			27973	176058	100	

SGO-8

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-8
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

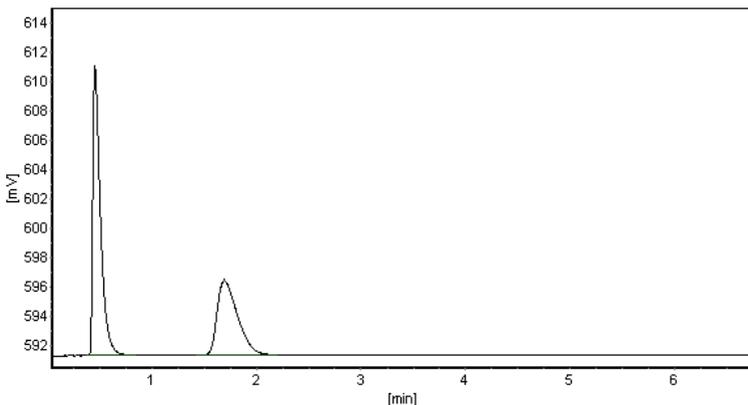
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.455	30757	167823	99.7664	BB
2	CO2	1.743	30	393	0.2336	BB
TOTAL			30787	168216	100	

SLG-9

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-9
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

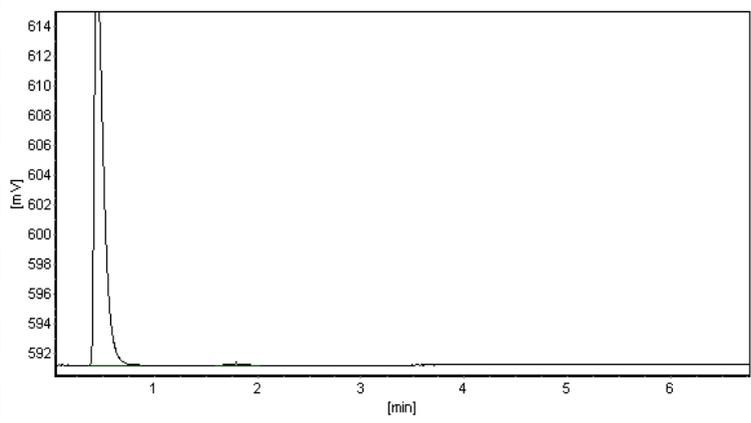
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.461	20510	102832	66.13633	BB
2	CO2	1.722	5164	67667	33.86367	BB
TOTAL			25674	170499	100	

SGO-9

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-9
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

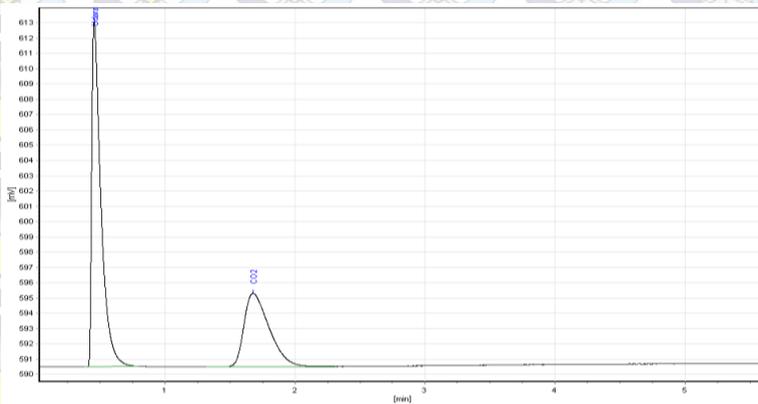
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.449	30980	180445	99.82135	BB
2	CO2	1.786	27	370	0.17865	BB
TOTAL			31007	180815	100	

SLG-10

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SLG-10
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

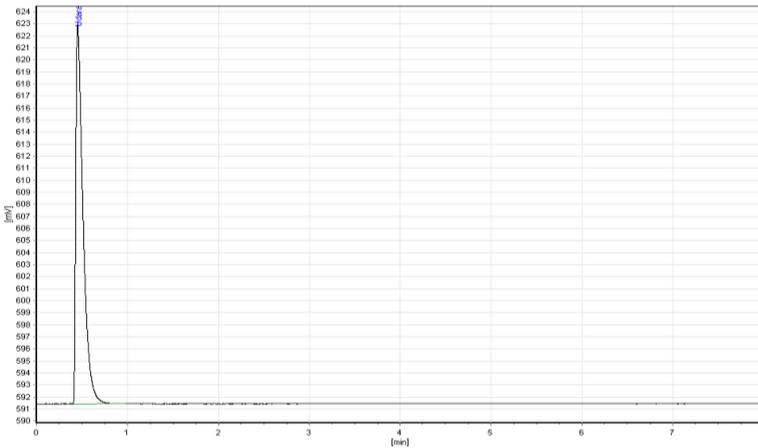
No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.457	20321	104517	65.98545	BB
2	CO2	1.717	5225	69387	34.01455	BB
TOTAL			25646	173904	100	

SGO-10

Chrom. File Name : C/D-7900E\ChrData\SGO-10
 Method Name : Biogas Porapak Q (Area ESTD)

Instrument Condition :

Inst. Model : GC7900; Equip.code : 12437
 Detector : TCD, Temp = 200C, Current: 20 mA
 Inlet : CIP, Temp = 80 C
 Coloumn : Porapak-Q
 Oven : 43C (8 min)



General Result

No	Compound Name	R.Time	Height	Area	Area%	Type
1	Udara	0.451	31462	177037	99.84346	BB
2	CO2	1.791	26	340	0.15654	BB
TOTAL			31488	177377	100	

Tabel Hasil Analisa GC (lanjutan)

<i>Sales Gas (SLG)</i>		<i>Sweep Gas Out (SGO)</i>	
Kode	% CO₂ (% volume)	Kode	% CO₂ (% volume)
SLG-11	29,98941	SGO-11	0,1683
SLG-12	34,95348	SGO-12	0,15739
SLG-13	35,89399	SGO-13	0,15435
SLG-14	35,54916	SGO-14	0,13423
SLG-15	35,84467	SGO-15	0,16911
SLG-16	33,41179	SGO-16	0,27293
SLG-17	40,14196	SGO-17	1,56406
SLG-18	38,96085	SGO-18	0,3044
SLG-19	40,47607	SGO-19	0,43868
SLG-20	39,20707	SGO-20	0,18908
SLG-21	46,49061	SGO-21	0,28767
SLG-22	39,44375	SGO-22	0,42076
SLG-23	32,91002	SGO-23	0,17556
SLG-24	33,16702	SGO-24	2,16017
SLG-25	37,65752	SGO-25	0,39181
SLG-26	30,37	SGO-26	0,25
SLG-27	36,31	SGO-27	0,69
SLG-28	38,9	SGO-28	0,97
SLG-29	40,57	SGO-29	1,27
SLG-30	42,13	SGO-30	1,43
SLG-31	42,18	SGO-31	1,51
SLG-32	40,2	SGO-32	2,47
SLG-33	43,26	SGO-33	2,49



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN B



Gambar B.1 Modul Kontaktor Membran Menyilang Ganda



Gambar B.2 Instalasi Peralatan Percobaan Absorpsi-Desorpsi Simultan dengan Kontaktor Membran Menyilang Ganda



Gambar B.3 *Gas Chromatography (GC) Analyzer*



Gambar B.4 *Gas Syringe*



Gambar B.5 *Seperangkat Alat Uji SEM*

