



SKRIPSI – TK141581

**KONTAKTOR MEMBRAN POLIPROPILENA UNTUK
PROSES ABSORPSI-DESORPSI CO₂ MENGGUNAKAN
VARIASI PELARUT AMIN TERAKTIVASI**

Disusun Oleh:

**Hafan Rofiq Syahnur
NRP. 2315 105 025**

**Yusuf Zaelana
NRP. 2315 105 028**

Dosen Pembimbing:

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

**Pembimbing II
Fadlilatul Taufany, ST., Ph.D
NIP. 1981 07 13 2005 01 1001**

**LABORATORIUM PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017**



FINAL PROJECT– TK141581

**POLIPROPILENE MEMBRANE CONTACTOR FOR
ABSORPTION-DESORPTION OF CO₂ PROCESS USING
DIFFERENT ACTIVATED AMINE SOLVENTS**

Proposed by :

**Hafan Rofiq Syahnur
NRP. 2315 105 025**

**Yusuf Zaelana
NRP. 2315 105 028**

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

**Advisor II
Fadlilatul Taufany, ST., Ph.D
NIP. 1981 07 13 2005 01 1001**

**HEAT AND MASS TRANSFER LABORATORY
DEPARTEMENT OF CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2017**

LEMBAR PENGESAHAN

**KONTAKTOR MEMBRAN POLIPROPILENA UNTUK
PROSES ABSORPSI-DESORPSI CO₂ MENGGUNAKAN
VARIASI PELARUT AMIN TERAKTIVASI**

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

Oleh :

Hafan Rofiq Syahnur
Yusuf Zaelana

NRP : 2315105 025
NRP : 2315105 028

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. YeniRahmawati, S.T., MT (Pembimbing I)
2. Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D (Pembimbing II)
3. Dr. Ir. Susianto, DEA (Penguji I)
4. Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D (Penguji II)
5. Prof. Ir. Renanto, MSc., Ph.D (Penguji III)



KONTAKTOR MEMBRAN POLIPROPILENA UNTUK PROSES ABSORPSI-DESORPSI CO₂ MENGGUNAKAN VARIASI PELARUT AMIN TERAKTIVASI

Disusun oleh : Hafan Rofiq Syahnur (2315105025)
Yusuf Zaelana (2315105028)

Dosen Pembimbing : Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.
Fadlilatul Taufany, ST., Ph.D

ABSTRAK

Teknologi kontaktor membran merupakan perkembangan metode pemisahan CO₂ yang menggabungkan proses absorpsi gas dengan pelarut dan teknologi membrane sehingga pengaturan pola aliran dapat dilakukan untuk menghindari masalah operasional pada teknologi absorpsi konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh variasi jenis pelarut terhadap proses absorpsi dan desorpsi CO₂ menggunakan kontaktor membran, mempelajari pengaruh parameter operasi laju alir gas umpan terhadap laju perpindahan massa CO₂ (fluks absorpsi) dan efisiensi pemisahan absorpsi CO₂, mempelajari pengaruh parameter operasi suhu pelarut terhadap laju perpindahan massa CO₂ (fluks desorpsi) dan efisiensi pemisahan desorpsi CO₂ serta mempelajari kinerja absorpsi-desorpsi kontaktor membran pada system kontinu terhadap laju perpindahan massa CO₂ dan efisiensi pemisahan CO₂. Pada penelitian digunakan kontaktor membrane *hollow fiber* polipropilena (PP) dengan modul terpisah antara proses absorpsi dan desorpsi menggunakan variasi pelarut amin teraktivasi. Pada proses absorpsi, pelarut dialirkan pada bagian *tube* dengan laju alir tetap 100 ml/menit dan gas umpan (*feed gas*) dialirkan pada bagian *shell* membran dengan variasi laju alir 200-600 ml/menit, kemudian pelarut yang kaya akan CO₂ dipanaskan dengan variasi suhu pelarut 30-70 °C dan masuk kedalam proses desorpsi dengan bantuan tekanan vakum sebesar 20 kPa. Konsentrasi gas CO₂

yang masuk dalam sales gas dan konsentrasi gas CO₂ di dalam pelarut dianalisa menggunakan titrasi *chittic*. Dari hasil penelitian pelarut terbaik yang menghasilkan fluks dan efisiensi pemisahan tertinggi adalah DEA teraktivasi, dimana untuk proses absorpsi pelarut terbaik adalah DEA-PZ dan untuk proses desorpsi adalah DEA-Arginin. Berdasarkan parameter operasinya, semakin besar laju alir gas umpan maka semakin tinggi fluks absorpsi dan berbanding terbalik dengan efisiensi pemisahan absorpsi CO₂ yang semakin rendah menghasilkan nilai fluks tertinggi sebesar $36,19 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{detik}$ dan efisiensi pemisahan absorpsi CO₂ tertinggi sebesar 97,55% dengan pelarut DEA-PZ. Sedangkan untuk proses desorpsi semakin tinggi suhu pelarut maka semakin tinggi fluks desorpsi dan efisiensi pemisahan desorpsi CO₂ menghasilkan nilai fluks tertinggi sebesar $18,5 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{detik}$ dan efisiensi pemisahan desorpsi CO₂ tertinggi sebesar 77,48% dengan pelarut DEA-Arginin. Secara keseluruhan kinerja modul membrane menunjukkan performa fluks dan efisiensi pemisahan absorpsi CO₂ terbaik pada 60 menit pertama dan mulai konstan untuk menit berikutnya.

Kata kunci : kontaktor membran, absorpsi, desorpsi, amin teraktivasi, fluks, pemisahan CO₂

POLIPROPILENE MEMBRANE CONTACTOR FOR ABSORPTION-DESORPTION OF CO₂ PROCESS USING DIFFERENT ACTIVATED AMINE SOLVENTS

Proposed By : Hafan Rofiq Syahnur (2315105025)
Yusuf Zaelana (2315105028)

Advisors : Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.
Fadlilatul Taufany, ST., Ph.D

ABSTRACT

Membrane contactor technology is a development of CO₂ removal method which combines gas absorption process through the solvent and membrane technology, it is conducted in order to set a pattern of flow rate to avoid operational problem in the conventional absorption technology. The research aims to study four things including the influence of solvent variation towards CO₂ absorption and desorption process by utilizing membrane contactor, the influence of feed gas flow rate towards CO₂ mass transfer (absorption flux) and separation efficiency of CO₂ absorption, the influence of solvent temperature towards CO₂ mass transfer (desorption flux) and separation efficiency of CO₂ absorption, and the performance of absorption-desorption membrane contactor in the continuity system towards CO₂ mass transfer and separation efficiency of CO₂. The research employs polypropylene (PP) hollow fiber as membrane contactor with separated module of absorption and desorption process by using solvent variation of activated amine. On the absorption process, a solvent is flowing through the tube of membrane with a constant flow rate about 100 ml/minute while the feed gas is flowing through the shell of membrane with a flow rate about 200-600 ml/minute, whereat the CO₂-rich solvent is heated on the temperature of 30-70 °C then entering desorption process which is assisted by vacuum pressure about 20 kPa. CO₂ concentration in the gas of absorption membrane outlet (sales gas) and within

the solvent are analysed by chittic titration. The result indicates that an activated DEA is the best solvent to create highest flux and separation efficiency. Besides, DEA-PZ has shown the best result as a solvent for absorption process while DEA-Arginine has shown the best result for the desorption process. According to the operation parameter, the higher the flow rate of feed gas is, the higher absorption flux will be, however, the CO₂ absorption separation efficiency inversely suggests a different result which goes lower. Absorption process apparently produces the highest flux value about $36,19 \times 10^{-4}$ mol/m².second and the highest CO₂ absorption separation efficiency about 97,55%. Meanwhile on the desorption process, the higher the solvent temperature is, the higher desorption flux and separation efficiency will be. It produces highest flux value about $18,5 \times 10^{-4}$ mol/m².second and the highest value of CO₂ desorption separation efficiency about 77,48%. Overall, the performance of membrane module shows that the best performance for CO₂ absorption flux and its separation efficiency happened over the first 60 minutes and become on a steady pace for the next time.

Keywords : membrane contactor, absorption, desorption, activated amine, flux, CO₂ mass transfer, chittic titration

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur kami sampaikan ke hadirat Allah SWT karena hanya dengan rahmat dan ridho-Nya kami dapat menyelesaikan Laporan Skripsi dengan judul :

“KONTAKTOR MEMBRAN POLIPROPILENA UNTUK PROSES ABSORPSI-DESORPSI CO₂ MENGGUNAKAN VARIASI PELARUT AMIN TERAKTIVASI”

Laporan Skripsi ini merupakan salah satu syarat kelulusan untuk memperoleh gelar sarjana di Departemen Teknik Kimia, FTI-ITS Surabaya. Selama penyusunan laporan ini, kami banyak mendapatkan bimbingan, bantuan, dan dukungan dari banyak pihak. Pada kesempatan kali ini, kami menyampaikan terimakasih kepada :

1. Bapak Juwari, S.T.,M.Eng., Ph.D. selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTI-ITS.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Ali Altway, MSc selaku Kepala Laboratorium Proses Perpindahan Panas dan Massa.
3. Ibu Dr. Yeni Rahmawati, ST., M.T dan Bapak Fadlilatul Taufany, ST., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dan banyak memberikan masukan bagi kami.
4. Bapak Dr. Ir, Susianto, DEA., dan Dr. Ibu Siti Nurkhamidah, S.T.,M.S.,Ph.D., dan Prof. Ir. Renanto, MSc., Ph.D selaku dosen penguji Seminar Skripsi.
5. Bapak dan Ibu selaku dosen pengajar serta seluruh karyawan Departemen Teknik Kimia FTI-ITS.
6. Orangtua dan keluarga kami atas segala kasih sayang dan perhatian yang telah diberikan.
7. Teman-teman Laboratorium Proses Perpindahan Panas dan Massa, rekan-rekan Teknik Kimia LJ Gasal 2015 dan K-53, serta semua pihak yang telah membantu secara langsung maupun tidak langsung.

Kami menyadari bahwa penyusunan Laporan Skripsi ini masih perlu penyempurnaan, oleh karena itu kami mengharap saran dan kritik yang membangun. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua, khususnya di bidang teknik kimia dan aplikasi industri kimia. Terima kasih.

Surabaya, Juli 2017

Penyusun

DAFTAR ISI

Abstrak	i
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	xi
Daftar Tabel	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Perumusan Masalah.....	5
I.3 Batasan Masalah.....	6
I.4 Tujuan Penelitian.....	6
I.5 Manfaat Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
II.1 CO ₂ dalam Gas Alam.....	9
II.1.1 CO ₂ (Karbon Dioksida).....	9
II.1.2 Efek Negatif CO ₂ dalam Gas Alam.....	10
II.2 Teknologi Pemisahan CO ₂ dari Gas Alam.....	10
II.2.1 Teknologi Absorpsi Konvensional.....	10
II.2.2 Teknologi Adsorpsi.....	11
II.2.3 Teknologi Distilasi Kriogenik.....	12
II.2.4 Teknologi Membran Permeasi.....	12
II.3 Absorpsi CO ₂ Menggunakan Kontaktor Membran Serat Berongga.....	13
II.4 Parameter Operasi pada Kontaktor Membran.....	18
II.5 Pola Aliran Gas dan Pelarut.....	21
II.6 Fenomena Pembasahan.....	22
II.7 Material Membran.....	25
II.8 Pemilihan Pelarut Alkanolamina.....	27
II.9 Aktivator yang digunakan dalam Absorpsi CO ₂	30
II.9 Posisi Penelitian (<i>State of the art</i>).....	33

BAB III METODE PENELITIAN.....	36
III.1 Garis Besar Penelitian	36
III.2 Bahan yang Digunakan	37
III.3 Variabel Penelitian	38
III.3.1 Variabel Tetap	38
III.3.2 Variabel Masukan.....	38
III.3.3 Variabel Respon	38
III.4 Rangkaian Alat Penelitian	39
III.5 Prosedur Penelitian.....	41
III.5.1 Proses Absorpsi CO ₂	41
III.5.2 Proses Desorpsi CO ₂	42
III.5.3 Proses Absorpsi-Desorpsi CO ₂ secara Kontinyu	44
III.6 Prosedur Analisa Hasil Penelitian	45
III.6.1 Analisa Laju Perpindahan Massa Gas CO ₂ dan Fluks Pemisahan CO ₂ pada Modul Kontaktor Membran Keluar Modul Membran	46
III.6.2 Analisa CO ₂ <i>Loading</i> dalam Pelarut Keluar Modul Membran.....	46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	49
IV.1 Proses Absorpsi	49
IV.1.1 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Laju Perpindahan Massa CO ₂ (Fluks) Absorpsi	49
IV.1.2 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Pemisahan Absorpsi CO ₂	53
IV.1.3 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO ₂ <i>loading</i>	54
IV.2 Proses Desorpsi	56
IV.1.1 Pengaruh Suhu Pelarut terhadap Laju Perpindahan Massa CO ₂ (Fluks) Desorpsi.....	56

IV.1.2 Pengaruh Suhu Pelarut terhadap Efisiensi Desorpsi	49
IV.1.3 Pengaruh Suhu Pelarut terhadap CO ₂ loading.....	51
IV.3 Uji Kinerja Modul Kontaktor Membran	63
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	69
V.1 Kesimpulan	69
V.2 Saran.....	70
DAFTAR PUSTAKA	xv
DAFTAR NOTASI.....	xx

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1	Kolom absorpsi konvensional dengan <i>packing</i> ..	10
Gambar II.2	Kolom adsorpsi	11
Gambar II.3	Permeabilitas berbagai senyawa gas melalui membran	12
Gambar II.4	Kontaktor Membran Serat Berongga	14
Gambar II.5	Peristiwa Perpindahan Massa CO ₂ Proses Absorpsi dalam Kontaktor Membran	15
Gambar II.6	Peristiwa Perpindahan Massa CO ₂ Proses Desorpsi dalam Kontaktor Membran	15
Gambar II.7	Pola aliran pada kontaktor membran.....	21
Gambar II.8	Sudut kontak dan pembasahan permukaan	22
Gambar II.9	Hasil SEM fiber membran PP (Accurel PP Q3/2), (a) Sebelum perendaman, (b) Setelah perendaman dengan air selama 7 hari	23
Gambar II.10	Struktur kimia membran polipropilena (PP)	25
Gambar II.11	Struktur kimia Arginin.....	31
Gambar III.1	Rangkaian alat kontaktor membran untuk proses absorpsi CO ₂	39
Gambar III.2	Rangkaian alat kontaktor membran untuk proses desorpsi CO ₂	39
Gambar III.3	Rangkaian alat proses absorpsi-desorpsi CO ₂ secara kontinyu untuk uji kinerja kontaktor membran	40
Gambar III.4	Diagram Alir Proses Absorpsi CO ₂ menggunakan Kontaktor Membran	42
Gambar III.4	Diagram Alir Proses Desorpsi CO ₂ menggunakan Kontaktor Membran	43
Gambar III.6	Diagram Alir Penelitian Absorpsi-Desorpsi secara Kontinyu	45
Gambar III.5	Skema alat titrasi <i>chittick</i>	48
Gambar IV.1	Pengaruh laju alir gas umpan terhadap fluks absorpsi CO ₂ pada berbagai jenis pelarut (CO ₂ : 40% vol ; Q _{pelarut} = 100 ml/menit ;	

	T= 303,15 K ; P=101 kPa)	50
Gambar IV.2	Profil konsentrasi gas CO ₂ pada perpindahan massa gas CO ₂ dari fasa gas ke fasa cairan.....	51
Gambar IV.3	Pengaruh laju alir gas umpan terhadap efisiensi pemisahan CO ₂ pada berbagai jenis pelarut (CO ₂ 40% volume; Q _{pelarut} = 100 ml/menit)	54
Gambar IV.4	Pengaruh laju alir gas umpan terhadap CO ₂ loading pada berbagai jenis pelarut (CO ₂ 40% volume ; Q _{pelarut} = 100 ml/menit)	55
Gambar IV.5	Profil konsentrasi gas CO ₂ pada perpindahan massa gas CO ₂ dari fasa cairan ke fasa gas dengan bantuan vakum.....	56
Gambar IV.6	Pengaruh suhu pelarut terhadap fluks desorpsi pada berbagai jenis pelarut (Q _{pelarut} = 100 ml/menit; P _{vakum} = 20 kPa).....	58
Gambar IV.7	Pengaruh suhu pelarut terhadap efisiensi desorpsi pada berbagai jenis pelarut umpan (Q _{pelarut} = 100 ml/menit ; P _{vakum} = 20 kPa).....	60
Gambar IV.8	Pengaruh suhu pelarut terhadap CO ₂ loading lean amine pada berbagai jenis pelarut umpan (Q _{pelarut} = 100 ml/menit ; P _{vakum} = 20 kPa).....	62
Gambar IV.9	Pengaruh suhu pelarut terhadap CO ₂ loading lean amine dan fluks desorpsi untuk pelarut DEA tunggal (Q _{pelarut} = 100 ml/menit ; P _{vakum} = 20 kPa)	63
Gambar IV.10	Pengaruh waktu operasi terhadap uji kinerja fluks absorpsi untuk variabel operasi terbaik (Q _g = 200 ml/menit ; Q _l = 100 ml/menit T = 70°C ; P _{vakum} = 20 kPa)	64
Gambar IV.11	Pengaruh uji kinerja terhadap efisiensi pemisahan CO ₂ untuk variabel optimal (Q _g = 200 ml/menit ; Q _l = 100 ml/menit T = 70°C ; P _{vakum} = 20 kPa)	66

DAFTAR TABEL

Tabel II.1	Sifat fisika karbondioksida (CO ₂).....	8
Tabel II.2	Temperatur transisi gelas (T_g) polimer	25
Tabel II.3	Perbandingan Pelarut Alkanolamina.....	27
Tabel II.4	Karakteristik Piperazin (PZ)	30
Tabel II.4	Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO ₂ Menggunakan Kontaktor Membran.....	33
Tabel III.1	Data Karakteristik Membran Polipropilena.....	41
Tabel IV.1	Perbandingan Kelarutan Pelarut Hasil Penelitian (α)	54

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang mempunyai cadangan gas yang cukup besar. Di tengah kondisi minyak bumi mentah yang tidak stabil dan kebutuhan energi yang semakin meningkat, gas alam ini menjadi energi alternatif yang sangat dibutuhkan. Berdasarkan data *Blueprint* Pengolahan Energi Nasional 2006 - 2025, kebutuhan energi bersumber dari gas alam bersamaan dengan batu bara akan meningkat dan menjadi energi alternatif pengganti minyak bumi. Untuk minyak bumi peningkatan kebutuhan terjadi dari 514.5 SBM menjadi 1144.9 SBM (Setara Barrel Minyak), gas alam dari 275.7 SBM menjadi 363.9 SBM dan batubara dari 152.6 SBM menjadi 472.4 SBM.

Sebagai energi alternatif, kualitas gas alam juga penting untuk ditingkatkan, dan di sisi lain, harga produk gas alam juga diharapkan dapat bersaing. Dalam hal ini, proses pemisahan gas alam dari kontaminan memiliki porsi yang besar dalam mempengaruhi harga gas alam. Oleh karena itu perlu ditemukannya teknologi pemisahan gas alam yang efektif dan efisien, sehingga kualitas dan harga gas alam dapat jauh lebih baik dan mendukung dalam pemenuhan kebutuhan energi bangsa.

Komposisi gas alam di Indonesia umumnya mengandung kontaminan CO₂ yang besar dan dominan. Salah satu contohnya adalah gas alam di Cepu memiliki kandungan gas CO₂ 30% dan Natuna mencapai 70%. Keberadaan gas CO₂ ini merugikan dalam berbagai aspek teknis dan kualitas produk. Sifatnya yang asam apabila dengan air dapat menyebabkan korosi pada peralatan pabrik, memiliki nilai panas (*heating value*) rendah sehingga menurunkan nilai jual, dan titik beku CO₂ yang rendah menyebabkan terbentuk *icing* (pembekuan) yang akan menyumbat perpipaan dan *heat exchanger* (Dortmundt dkk 1999). Oleh karena itu, pemisahan gas alam dari CO₂ menjadi

salah satu proses yang sangat penting dalam pengolahan gas alam.

Berbagai teknologi telah digunakan dalam proses pemisahan CO₂ dari gas alam seperti absorpsi, adsorpsi, distilasi kriogenik dan teknologi membran permeasi. Untuk absorpsi konvensional, penyerapan CO₂ belum begitu efisien karena laju alir gas dan laju alir pelarut saling mempengaruhi yang dapat mengakibatkan terjadi *entrainment*, *flooding*, *loading* dan *foaming* (Cooney 1989). Untuk distilasi kriogenik dibutuhkan instalasi yang sangat besar dan biaya operasi yang sangat mahal, sedangkan proses adsorpsi memiliki efektivitas yang buruk dalam pemisahan CO₂ menggunakan adsorben padat. Untuk teknologi membran permeasi, penurunan tekanan yang terjadi sangat besar, selektivitasnya yang rendah menyebabkan banyak kerugian dimana hidrokarbon ikut lolos bersamaan dengan CO₂ (Wallace 2005). Sampai saat ini absorpsi sebenarnya masih menjadi pilihan yang baik, namun kolom absorpsi konvensional membutuhkan energi besar, instalasinya besar dan tergantung pada unit-unit operasi lain. Kekurangan-kekurangan ini mendorong penelitian ke arah teknologi kontaktor baru yang diharapkan dapat menanggulangi masalah diatas.

Kontaktor membran adalah metode baru dalam mengontakkan pelarut dengan CO₂ adalah menggunakan kontaktor membran serat berongga. Metode ini mempunyai beberapa kelebihan seperti memiliki luas kontak gas-liquid yang lebih besar, ukuran alat yang lebih kecil, bersifat modular yaitu mudah untuk di-*scale up* , serta laju alir gas dan liquid dapat diatur dengan mudah secara independen sehingga dapat mengatasi masalah operasional. (Mansourizadeh dan Ismail 2009).

Perkembangan kontaktor membran dalam pemisahan CO₂ telah dilakukan oleh Feron dan Jansen (2002) secara hibrid konvensional menggunakan kontaktor membran untuk proses absorpsi dan kolom regenerasi (absorpsi konvensional) untuk proses desorpsi dengan pelarut amina primer (MEA). Mereka

membandingkan kinerja absorber membran dengan kinerja absorber *packed column*. Hasil menunjukkan dengan kinerja absorpsi CO₂ yang sama pada kolom absorber konvensional, namun ukuran absorber dapat dikurangi sepuluh kali lipat dengan menggunakan membran absorber. Kosaraju, dkk (2005) melakukan simulasi dalam pemisahan CO₂ menggunakan kontakor membran baik dalam proses absorpsi maupun desorpsi. Proses dilakukan pada dua modul terpisah menggunakan poliamidoamina (PAMAM) sebagai pelarut dan gas helium sebagai gas desorber. Hasil menunjukkan kinerja kontakor membran stabil dan material membran tidak terbasahi oleh pelarut.

Teknologi kontakor membran terus berkembang dengan munculnya penelitian tentang desorpsi menggunakan teknologi membran untuk regenerasi pelarut. Namun perlu diperhatikan bahwa penelitian tentang CO₂ desorber melalui kontakor membran masih sangat jarang. Fang, dkk. (2009) melakukan penelitian dalam pemisahan CO₂ menggunakan kontakor pada dua modul terpisah antara absorpsi dan desorpsi. Penelitian dilakukan dengan proses vakum untuk regenerasi larutan amin dalam proses desorpsi serta pemanasan terhadap pelarut. Hasil menunjukkan bahwa pelarut kaya CO₂ yang dipanaskan terlebih dahulu akan meningkatkan kinetika reaksi sehingga regenerasi pelarut semakin tinggi.

Pada tahun 2007 sebuah penelitian menyebutkan absorben yang dapat digunakan dalam absorpsi CO₂ menggunakan kontakor membran serat berongga ini adalah air, NaOH, KOH, MEA, DEA, MDEA, K₂CO₃, garam dari amina (Lu 2007), dan disebutkan juga bahwa pelarut alkanolamina masih menjadi pelarut yang paling baik. Banyak penelitian absorpsi-desorpsi CO₂ dengan kontakor membran masih menggunakan pelarut tunggal tanpa ada campuran aktivator, seperti Khaisri, dkk. (2011), Lv, dkk. (2012), dan Fang, dkk. (2009) yang menggunakan MEA sebagai pelarut. Kemudian Mansourizadeh dan Ismail (2011), Karoor dan Sirkar (1993), menggunakan air,

serta beberapa penelitian lain yang menggunakan NaOH, MDEA, ataupun DEA (Rangwala, 1996). Beberapa amina memiliki beberapa kelemahan masing-masing, yaitu seperti amina golongan primer dan sekunder yang laju reaksinya lebih cepat atau reaktif dibandingkan amina golongan tersier, namun amina golongan tersier memiliki regenerasi yang lebih tinggi dibandingkan amina primer dan sekunder (Mandal, dkk. 2003).

Yeon, dkk. (2004) melakukan absorpsi CO₂ menggunakan kontaktor membran untuk absorpsi dan kolom desorber untuk regenerasi pelarut dengan mencampurkan piperazine dan triethanolamina (TEA) sebagai pelarut. Hasil menunjukkan bahwa TEA yang memiliki kapasitas absorpsi rendah dapat ditingkatkan dengan penambahan piperazin. TEA adalah amina tersier dengan volatilitas yang tinggi dapat membantu membran serat berongga terjaga dari fenomena pembasahan. Kemudian Hedayat, dkk. (2011) melakukan penelitian untuk absorpsi gas CO₂ dan H₂S dari gas alam menggunakan kontaktor membran dengan membandingkan pelarut MDEA dicampur dengan MEA dan MDEA dengan DEA. Dari hasil penelitiannya, penambahan MEA ke dalam MDEA dapat meningkatkan efisiensi pemisahan CO₂, sedangkan penambahan DEA tidak memberikan hasil yang signifikan. Rahim, dkk. 2015 menggunakan empat pelarut *amino acid salt* (AAS) yang berbeda dan dibandingkan dengan larutan monoethanolamine (MEA) dan NaOH. Hasil menunjukkan bahwa AAS dapat meningkatkan performansi dari absorpsi-desorpsi CO₂ jika dibandingkan dengan MEA.

Dalam penelitian ini akan digunakan dua modul kontaktor membran yang terpisah antara proses absorpsi dan desorpsi CO₂ menggunakan variasi pelarut amin teraktivasi. Pelarut yang digunakan adalah *Diethanolamine* (DEA) dengan penambahan aktivator, seperti piperazin (PZ) dan arginin. Penggunaan campuran pelarut amin tersebut diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pemisahan CO₂ dan mengurangi biaya penggunaan pelarut sehingga lebih ekonomis. Pengamatan dilakukan untuk mengetahui pengaruh parameter operasi berupa variasi jenis

pelarut dan suhu pelarut terhadap laju absorpsi-desorpsi CO₂ (fluks), efisiensi pemisahan CO₂ dan CO₂ *loading* pada modul membran kontaktor. Dari hasil penelitian diharapkan dapat mengetahui parameter operasi yang terbaik untuk proses absorpsi-desorpsi dengan nilai efisiensi tertinggi.

I.2 Perumusan Masalah

Dewasa ini, telah banyak dilakukan pengembangan penelitian absorpsi-desorpsi menggunakan kontaktor membran dalam pemisahan gas campuran, terutama pemisahan gas CO₂ dari gas alam. Salah satu penelitian terdahulu yang pernah dilakukan adalah tentang kontaktor membran menyilang ganda untuk proses absorpsi-desorpsi CO₂ secara simultan dalam satu modul yang dilakukan oleh Widyawati dan Intan (2016) menggunakan pelarut *Dietanolamine* (DEA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju perpindahan massa CO₂ (fluks) desorpsi jauh lebih kecil dibandingkan dengan fluks absorpsi. Adanya perbedaan yang signifikan nilai fluks absorpsi-desorpsi disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya, pertama pelarut yang digunakan adalah pelarut DEA tunggal/tidak teraktivasi, yang mana pelarut ini memiliki kemampuan yang cukup baik dalam mengabsorpsi CO₂ namun buruk dalam regenerasinya (Yan dkk, 2010 dan Lu dkk, 2007). Kedua, pelarut DEA sebelum masuk kedalam proses desorpsi tidak dilakukan variasi terhadap laju alir gas umpan serta pemanasan terhadap pelarut sebelum masuk kedalam proses desorpsi sehingga menghasilkan fluks desorpsi yang rendah. Pemanasan yang dimaksud pada penelitian sebelumnya tidak dapat dilakukan karena modul membran menyilang ganda terjadi dalam satu modul sehingga terjadinya perlambatan penyerapan CO₂ didalam membran kontaktor.

Oleh karena itu, dilakukan pengembangan penelitian menggunakan kontaktor membran *hollow fiber* polipropilena (PP) yang terpisah antara proses absorpsi dan desorpsi menggunakan (a) senyawa golongan amin sekunder yaitu *Diethanolamine* (DEA) dan (b) DEA teraktivasi dengan aktivatornya piperazin

(PZ) dan arginin. Serta dilakukan variasi laju alir gas umpan pada proses absorpsi dan variasi suhu pemanasan pelarut DEA sebelum masuk kedalam proses desorpsi. Pengaruh dari laju alir gas umpan dan suhu pelarut DEA dalam penelitian ini akan dipelajari untuk dapat meningkatkan laju perpindahan massa CO₂ (fluks) dan efisiensi pemisahan CO₂ dari gas campuran untuk masing-masing proses absorpsi dan desorpsi.

I.3 Batasan Masalah

1. Serat membran yang digunakan dalam modul kontaktor membran terbuat dari membran polipropilena (PP).
2. Proses absorpsi dan desorpsi dengan kontaktor membran dilakukan dengan dua modul yang terpisah.
3. Pelarut yang digunakan adalah *Dietanolamine* (DEA) tunggal dan DEA teraktivasi dengan aktivatornya piperazin (PZ) dan arginin.
4. Laju alir gas umpan masuk proses absorpsi diatur sesuai variabel penelitian.
5. Proses desorpsi dilakukan dengan pemanasan suhu pelarut sesuai variabel penelitian dan dibantu dengan tekanan vakum.

I.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini, yaitu :

1. Mempelajari pengaruh variasi jenis pelarut terhadap proses absorpsi dan desorpsi CO₂ menggunakan kontaktor membran.
2. Mempelajari pengaruh parameter operasi laju alir gas umpan terhadap laju perpindahan massa CO₂ (fluks absorpsi) dan efisiensi pemisahan absorpsi CO₂.
3. Mempelajari parameter operasi pengaruh suhu pelarut terhadap laju perpindahan massa CO₂ (fluks desorpsi) dan efisiensi pemisahan desorpsi CO₂.
4. Mempelajari kinerja absorpsi-desorpsi kontaktor membran pada sistem kontinu terhadap laju perpindahan massa CO₂ dan efisiensi pemisahan CO₂.

I.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Dapat dijadikan sebagai referensi atau rujukan dalam pengaplikasian kontaktor membran untuk absorpsi-desorpsi CO₂ dalam proses pengolahan gas alam.
2. Keberhasilan penelitian ini bermanfaat dalam upaya penghematan energi dan biaya serta kebutuhan pelarut untuk proses pemisahan gas CO₂ di industri gas alam.

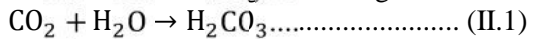
(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1 CO₂ dalam Gas Alam

II.1.1 CO₂ (Karbon Dioksida)

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



Karbon dioksida berubah fasa menjadi padat pada suhu -78.51°C atau -109.3°F pada tekanan atmosfer. Densitas CO₂ pada keadaan standar ialah 1.98 kg/m^3 .

Tabel II.1 Sifat fisika karbondioksida (CO₂)

Sifat	Nilai
Titik didih	$-57,5^\circ\text{C}$
Titik beku normal	$-78,4^\circ\text{C}$
Temperatur kritis	38°C
Tekanan kritis	$0,6 \text{ Kg/cm}^2.\text{G}$
Panas peleburan	1900 Kal/mol
Panas penguapan	6030 Kal/mol

(Sumber: Perry, 2008)

Karbon dioksida juga bersifat toksik pada konsentrasi yang tinggi. Efek yang ditimbulkan oleh CO₂ ialah sebagai berikut :

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

- d. Konsentrasi 8% CO₂ dapat menyebabkan sakit kepala berat, tremor, hilang kesadaran, penglihatan kabur dan berkeringat.

II.1.2 Efek Negatif CO₂ dalam Gas Alam

Keberadaan CO₂ dalam gas alam akan menimbulkan kerugian jika tidak dihilangkan. Kerugian ini mencakup kerusakan alat yang ditimbulkan, hingga penurunan kualitas produk gas alam.

Beberapa kerugian yang ditimbulkan CO₂ antara lain :

- a. Bersifat asam jika ada kandungan air, membentuk H₂CO₃ yang dapat memicu korosi pada peralatan pabrik, seperti di pendingin, perpipaan dan injektor turbin.
- b. Pada suhu rendah dapat menyebabkan terbentuk *icing* (pembekuan), sehingga menyumbat perpipaan dan merusak *main heat exchanger* (Dortmunt dkk 1999)
- c. CO₂ memiliki nilai panas (*heating value*) yang rendah, sehingga menurunkan nilai kalor pembakaran gas alam.
- d. Mengganggu proses pengolahan gas alam menjadi LNG dan CNG.

Sehingga dari penjelasan diatas, dapat diambil kesimpulan bahwa CO₂ harus dipisahkan dari gas alam karena dapat menimbulkan berbagai kerugian.

II.2 Teknologi Pemisahan CO₂ dari Gas Alam

II.2.1 Teknologi Absorpsi Konvensional

Pemisahan CO₂ dengan absorpsi adalah metode yang paling sering dijumpai. Absorpsi lebih disukai dalam industri pengolahan gas dibandingkan teknologi lain karena efektivitas yang tinggi, kualitas produk yang baik. Teknologi absorpsi prinsipnya ialah melarutkan CO₂ dalam pelarut yang sesuai. Kelarutan CO₂ dalam absorben yang tinggi dibandingkan hidrokarbon akan menghasilkan produk gas alam keluaran yang bersih dari CO₂. Untuk dapat mengabsorpsi CO₂ maka absorben

(pelarut) dan *sour gas* haruslah dikontakkan didalam kontaktor kolom.

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



Gambar II.1 Kolom absorpsi konvensional dengan *packing*

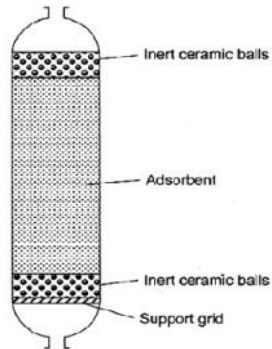
Namun kontaktor kolom ini memiliki berbagai kekurangan seperti terbentuknya *flooding*, *loading*, *foaming*, dan *channeling*. Hal ini menyebabkan laju perpindahan massa kurang baik sehingga absorpsi menjadi tidak efisien.

II.2.2 Teknologi Adsorpsi

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

- a. Iron sponge
- b. Zing oxide
- c. Molecular sieve

Kelebihan dari metode ini adalah cukup baik dalam menangkap gas H_2S namun kurang baik dalam adsorpsi CO_2 , karena efektivitasnya yang buruk. Selain itu regenerasi dari adsorben ini relatif sulit dan membutuhkan suhu yang tinggi.



Gambar II.2 Kolom adsorpsi

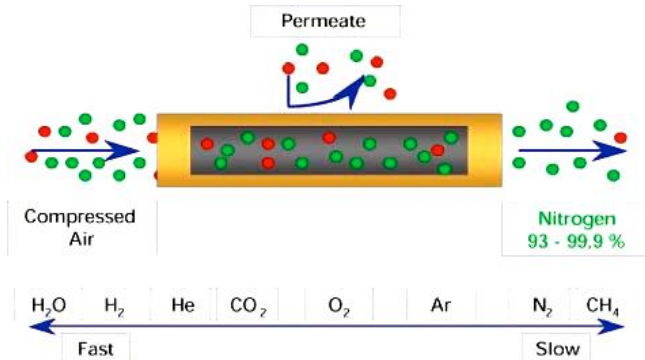
II.2.3 Teknologi Distilasi Kriogenik

Distilasi kriogenik adalah destilasi pada suhu yang sangat rendah, mencapai $-180^{\circ}C$. Proses distilasi kriogenik ini terdiri dari dua, tiga atau empat kolom fraksinasi, dimana kolom pertama beroperasi pada tekanan 3100 – 4500 kPa dan kolom kedua beroperasi pada tekanan sedikit lebih rendah. Distilasi kriogenik ini membutuhkan persiapan awal umpan yang rumit, instalasi unit ini sangat mahal dan kompresi yang dibutuhkan menyebabkan operasi kompresor besar yang berbiaya tinggi. Sehingga secara ekonomi, jika tidak dalam keadaan mendesak, pilihan distilasi kriogenik ini relatif tidak diminati.

II.2.4 Teknologi Membran Permeasi

Membran ialah suatu penghalang selektif di antara dua fasa sehingga molekul tertentu dapat menembusnya sedangkan molekul lain tidak. Pemisahan CO_2 menggunakan membran ialah dengan prinsip perbedaan permeabilitas antara CO_2 dengan CH_4 . Permeabilitas atau kemampuan relatif senyawa melewati

membran, secara khusus untuk komposisi gas alam diilustrasikan oleh **Gambar II.3** :



Gambar II.3 Permeabilitas berbagai senyawa gas melalui membran

Sehingga, jika gas alam dilewatkan melalui membran maka CO₂ akan lebih cepat lolos melewati membran dan gas alam yang bersih akan keluar sebagai produk. Laju perpindahan molekul pada membran ditentukan oleh permeabilitasnya di dalam membran dan juga oleh gaya penggeraknya (*driving force*). Gaya penggerak tersebut dapat berupa tekanan, konsentrasi, temperatur antara dua fluida, maupun perbedaan potensial listrik. Namun teknologi ini mempunyai beberapa kelemahan, yaitu selektivitasnya yang buruk dan penurunan tekanan yang sangat besar. Selektivitas dari membran yang buruk menyebabkan banyak hidrokarbon yang hilang ikut terlewat bersama-sama dengan CO₂. Hal ini tentunya menyebabkan kerugian yang relatif besar.

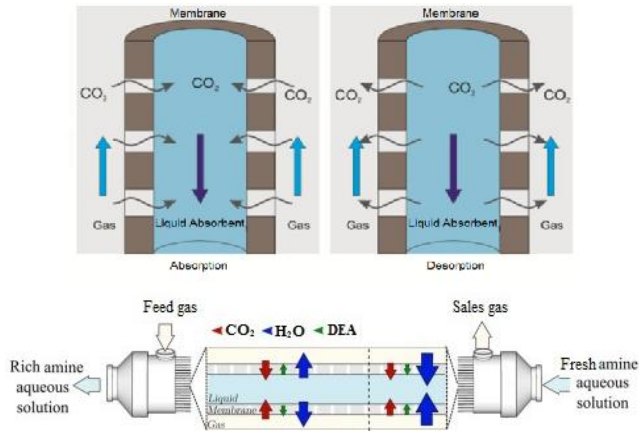
II.3 Absorpsi CO₂ Menggunakan Kontaktor Membran Serat Berongga

Kontaktor membran serat berongga merupakan sebuah teknologi baru berupa penggabungan antara teknologi absorpsi dan membran permeasi. Kontaktor ini berbentuk seperti *fiber*

dengan *shell* dan *tube*. Solven dan gas alam akan dikontakkan melalui lapisan membran dengan diameter porositas tertentu. Perbedaan permeabilitas komposisi gas alam juga akan mempengaruhi absorpsi.

Absorpsi CO₂ dengan menggunakan membran serat berongga ini memiliki kelebihan yaitu seperti memiliki luas kontak gas-liquid yang lebih besar, ukuran alat yang lebih kecil, bersifat modular yaitu mudah untuk di-*scale up*, serta laju alir gas dan liquid dapat diatur dengan mudah secara independen sehingga dapat mengatasi masalah operasional. (Mansourizadeh dan Ismail 2009). Metode ini juga aplikatif dan dapat menghindari permasalahan dalam kontakor kolom di atas (*channeling, flooding, loading, foaming*). Namun perlu diteliti lagi mengenai kondisi proses yang paling optimum untuk proses absorpsi menggunakan membran serat berongga ini, seperti pelarut, suhu, tekanan, laju alir, bahan membran dan lain-lain.

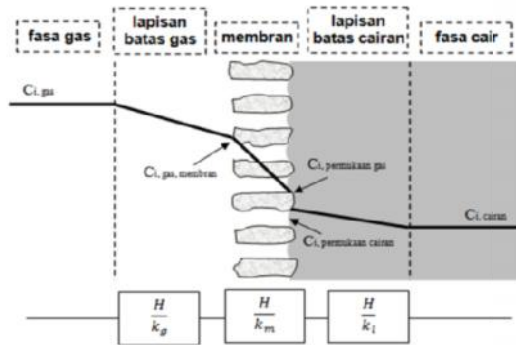
Kontaktor serat berongga yang memiliki struktur seperti **Gambar II.4** menggunakan membran serat berongga (*hollow fiber*) sebagai pemisah antar fasa satu dengan fasa lainnya. Membran *hollow fiber* dapat diartikan sebagai membran kapiler yang terdiri dari bagian *tube* dan *shell*, persis seperti *heat 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 kontakor membran bisa mencapai 1.600-6.600 m²/m³ (Mulder, 1996).



Gambar II.4 Kontaktor Membran Serat Berongga

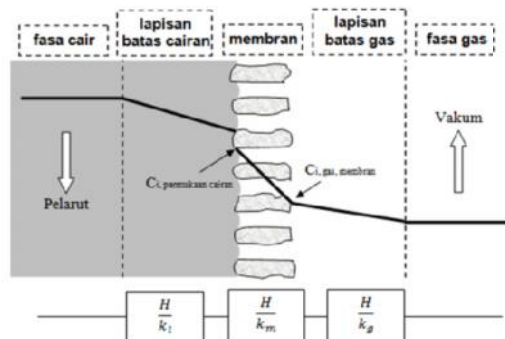
Pada umumnya membran yang digunakan dalam proses industri dapat dibagi menjadi dua jenis bahan, yaitu bahan biologis dan membran sintetik. Membran biologis merupakan membran yang penting bagi kehidupan karena setiap sel hidup pasti memiliki membran di dalamnya, sedangkan membran sintetik merupakan membran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

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, dkk., 2014). Proses pemisahan CO₂ menggunakan kontaktor membran disajikan pada **Gambar II.5**.



Gambar II.5 Peristiwa Perpindahan Massa CO₂ Proses Absorpsi dalam 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 (Rahmawati dkk, 2014). Peristiwa perpindahan massa ini berlaku sebaliknya untuk proses desorpsi seperti disajikan pada **Gambar II.6**.



Gambar II.6 Peristiwa Perpindahan Massa CO₂ Proses Desorpsi dalam Kontaktor Membran

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.

$$J_i = k_{ig} (C_{ig} - C_{img}) = k_{im} (C_{img} - C_{ilg}) = k_{il} (C_{ilg} - C_{il}) \quad (\text{II.2})$$

Dimana :

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

k_{im} = koefisien perpindahan massa dalam membran komponen i (m/det)

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

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 ($1/k_L$) dengan persamaan teoritis hambatan seri sebagai berikut. (Kreulen dkk., 1993b)

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{k_{il} E} + \frac{1}{k_{im} H} + \frac{1}{k_{ig} H} \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

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 :

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{k_{il}E} + \frac{d_o}{k_{im}Hd_{im}} + \frac{d_o}{k_{ig}Hd_i} \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

H adalah konstanta hukum Henry tak berdimensi yang merupakan perbandingan konsentrasi gas pada keadaan setimbang terhadap konsentrasi pelarut (Qi dan 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 CO₂ menggunakan air, hambatan perpindahan massa dihubungkan dengan fasa cairan yang bergantung pada hidrodinamika percobaan dan memerlukan laju alir cairan tetap (Mansourizadeh dan Ismail, 2009).

II.4 Parameter Operasi pada Kontaktor Membran

Dalam pengoperasian kontaktor membran untuk pemisahan CO₂, 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 CO₂ yang diserap semakin besar. Berdasarkan penelitian dari Kim dan Yang (2000), pada laju reaksi yang tinggi, konsentrasi CO₂ di bagian cairan

keluar lebih tinggi jika laju alir cairan lebih rendah, sehingga konsentrasi CO_2 akan menurun dengan meningkatnya laju alir pelarut. Selain itu Lv, dkk., (2012) telah melakukan sebuah penelitian mengenai absorpsi CO_2 dan SO_2 menggunakan kontaktor membran serat berongga, polipropilena, dan hasil menunjukkan bahwa laju alir cairan memberikan pengaruh signifikan terhadap proses absorpsi. Semakin besar laju alir cairan akan meningkatkan efisiensi absorpsi CO_2 dan koefisien perpindahan massa gas ke dalam cairan. Namun, Kosaraju dkk. (2005) mendapatkan hasil sedikit berbeda yaitu peningkatan laju alir cairan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap koefisien perpindahan massa.

2. Konsentrasi pelarut

Kim dan 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 CO_2 berkurang. Kinerja pemisahan ditunjukkan sebagai persen pemisahan CO_2 , dimana persen pemisahan CO_2 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 CO_2 . Laju alir gas yang tinggi menyebabkan jumlah CO_2 yang diabsorpsi semakin meningkat.

4. Tekanan Parsial CO_2

Kinerja perpindahan massa, ditunjukkan sebagai fluks CO_2 melalui fiber membran. Feron dan Jansen (1995) melaporkan bahwa pada temperatur ruang, fluks merupakan fungsi rata-rata logaritmik tekanan parsial CO_2 . Pada tekanan parsial CO_2 yang rendah, fluks CO_2 meningkat hampir linear dengan meningkatnya tekanan parsial CO_2 . 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*) (UP_b). Jika tekanan gas dinaikkan melebihi UP_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.

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* (de Montigny dkk, 2006).

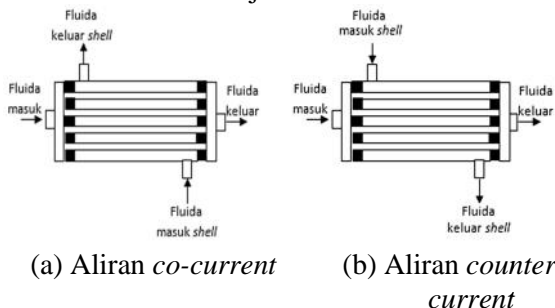
II.5 Pola Aliran Gas dan Pelarut

Pola aliran gas dan pelarut memiliki dampak pada performansi membran. Pada umumnya terdapat dua jenis mode aliran dalam kontaktor membran. Mode yang pertama adalah pelarut mengalir dalam sisi *tube* (bagian dalam membran) sedangkan gas mengalir pada sisi *shell* (bagian luar membran). Dibandingkan mode yang kedua, dimana gas mengalir pada *tube* dan pelarut mengalir pada *shell*. Dalam pemisahan CO₂ laju perpindahan massa dengan pelarut yang mengalir pada sisi *tube* 30% lebih tinggi dibandingkan pelarut yang mengalir pada sisi *shell*, hal ini menunjukkan bahwa mode pertama lebih berpengaruh baik dalam pemisahan CO₂ (Zhu dkk, 2003).

Pada pola aliran paralel kedua fasa fluida dapat mengalir sejajar dengan *fiber* yang terbagi menjadi aliran searah (*co-current*) atau aliran berlawanan (*counter-current*). Dalam hal ini

jenis aliran berlawanan memiliki efisiensi perpindahan 20% lebih baik dibandingkan jenis aliran searah (Rajabzadeh dkk, 2009). Pada aliran berlawanan, gaya dorong yang lebih besar sehingga lebih dipilih, dimana pada kondisi 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.

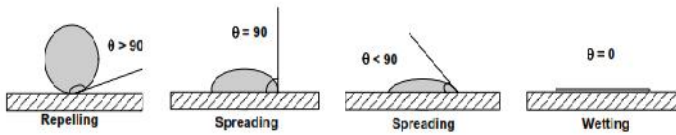
Untuk jenis aliran pada pola aliran fluida paralel pada kontaktor membran disajikan dalam **Gambar II.7**.



Gambar II.7 Pola aliran pada kontaktor membran

II.6 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.8**.



Gambar II.8 Sudut kontak dan pembasahan permukaan

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 dan fiber membran, serta ukuran pori membran. Hubungan ini ditunjukkan dengan persamaan Laplace-Young sebagai berikut:

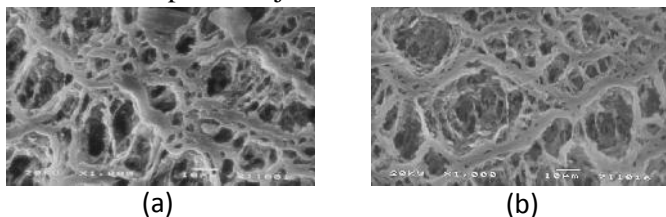
$$\Delta P = - \frac{2\gamma_L \cos \theta}{r_{maks}} \dots\dots\dots (II.5)$$

Dengan 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.5 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.

Pengaruh pelarut terhadap morfologi permukaan fiber membran karena pembasahan membran dapat diperoleh dari hasil analisa SEM seperti disajikan dalam **Gambar II.9**.



Gambar II.9 Hasil SEM fiber membran PP (Accurel PP Q3/2),
(a) Sebelum perendaman, (b) Setelah perendaman dengan air selama 7 hari

Gambar II.9 menunjukkan perbedaan kekasaran dan perubahan ukuran pori membran. Perubahan tersebut kemungkinan 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).

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 dan 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 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.

II.7 Material Membran

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

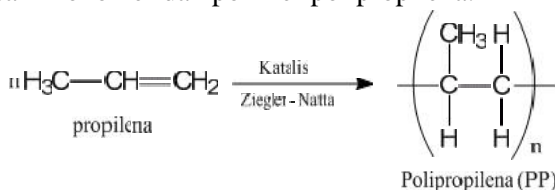
memiliki T_g lebih tinggi dibandingkan PET dan PP sehingga sifatnya lebih stabil.

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. Pada penelitian ini, membran yang digunakan adalah membran sintetik yang terbuat dari salah satu jenis polimer, yaitu polipropilena (PP). Polipropilena adalah termoplastik yang terbuat dari monomer propilena yang memiliki sifat kaku, tidak berbau, dan tahan terhadap bahan kimia pelarut, asam, dan basa. Polipropilena bersifat inert terhadap bahan kimia sehingga tidak mengganggu reaksi antara CO_2 dengan absorbent senyawa amina pada proses absorpsi. **Gambar II.10** berikut menggambarkan struktur dari monomer dan polimer polipropilena.



Gambar II.10 Struktur kimia membran polipropilena (PP)

Polipropilena juga bersifat hidrofobik, tetapi memiliki T_g yang rendah, sehingga kurang stabil dibanding PTFE dan rentan

terhadap pembasahan. Kelebihannya yaitu memiliki *range* pori yang lebih besar dan harganya jauh lebih murah dibanding PTFE. 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 CO₂ cenderung menurun sampai akhirnya bernilai konstan. Hal ini menunjukkan bahwa membran mengalami pembasahan pada awal percobaan dan kemudian stabil.

II.8 Pemilihan Pelarut Alkanolamina

Umumnya pelarut dalam proses absorpsi menggunakan absorbent fisik dan absorbent kimia. Dalam pemilihan pelarut harus memenuhi kriteria diantaranya (Yan dkk, 2014) :

- a. Reaktivitas gas yang tinggi (*reactivity*)
- b. Kemampuan mengabsorpsi
- c. Performa regenerasi terhadap CO₂
- d. Tegangan permukaan yang tinggi
- e. Viskositas yang rendah
- f. Kompabilitas terhadap material membran

Tegangan permukaan dan kompabilitas terhadap material membran merupakan faktor utama dalam pemilihan pelarut dalam proses kontak membran. Tegangan permukaan tinggi akan dapat menghindari masalah pembasahan pada membran (Ismail dkk, 2009). Untuk perbandingan tegangan permukaan dari berbagai jenis pelarut adalah pelarut fisik < pelarut kimia < garam asam amino < absorbent campuran. Dalam hal ini absorbent campuran merupakan pelarut yang memiliki tegangan permukaan yang lebih tinggi (Lu dkk, 2010).

Pada absorbent tunggal, kemampuan penyerapan CO₂ dari berbagai jenis pelarut adalah NaOH > TEPA > GLY > MEA > DEA > DIPA > AMP > TEA > MDEA > K₂CO₃. Namun apabila diurutkan berdasarkan kemampuan regenerasi CO₂ (untuk mengurangi energi dan mendaur ulang absorbent) adalah TEA > MDEA > DEA > AMP > DIPA > MEA > NaOH. Data ini menunjukkan adanya jenis pelarut yang memiliki performa

absorpsi CO₂ yang baik namun sulit diregenerasi, begitupun sebaliknya. Oleh karena itu dikembangkan berbagai jenis pelarut yang ditambahkan aktivator yang mampu meningkatkan absorpsi CO₂.

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

Senyawa alkanolamina yang digunakan sebagai absorben pada absorpsi CO₂ terbagi atas :

1. *Primary amine* : *Monoethanole Amine* (MEA)
2. *Secondary amine* : *Diethanole Amine* (DEA)
3. *Tertiary amine* : *Methyl Diethanole Amine* (MDEA) dan *Tetraethanol Amine* (TEA).

Ketiga jenis senyawa alkanoamina tersebut memiliki kekurangan dan kelebihan yang dibandingkan pada **Tabel II.3**.

Tabel II.3 Perbandingan Pelarut Alkanolamina

Pelarut	Kelebihan	Kekurangan
<i>Monoethanole Amine</i> (MEA)	<ul style="list-style-type: none"> • Sangat reaktif terhadap CO₂ dan H₂S. • Mampu menghilangkan CO₂ dan H₂S 	<ul style="list-style-type: none"> • Alat rentan mengalami korosi, terutama jika konsentrasinya di atas 20% wt.

Tabel II.3 Lanjutan.

Pelarut	Kelebihan	Kekurangan
	<p>secara bersamaan</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Recovery</i> CO₂ dan H₂S tinggi • Harganya paling murah dibanding pelarut amin lainnya. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mengalami reaksi <i>irreversible</i> dengan COS dan CS₂ sehingga tidak cocok digunakan untuk gas yang mengandung kedua senyawa tersebut. Tekanan uapnya tinggi sehingga banyak massa yang hilang saat diregenerasi. • Energi yang dibutuhkan untuk regenerasi cukup tinggi.
<p><i>Diethanole Amine</i> (DEA)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tekanan uapnya lebih rendah dibanding MEA sehingga mengurangi kehilangan massa saat regenerasi. • Dapat digunakan untuk absorpsi gas yang mengandung COS dan CS₂. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat bereaksi dengan CO₂ secara <i>irreversible</i> sehingga pelarut ini tak optimal jika digunakan untuk absorpsi gas dengan kandungan CO₂ yang tinggi.

Tabel II.3 Lanjutan.

Pelarut	Kelebihan	Kekurangan
<i>Methyl Diethanole Amine</i> (MDEA) dan <i>Triethanole Amine</i> (TEA)	<ul style="list-style-type: none"> • Tekanan uapnya sangat rendah sehingga dapat digunakan dengan konsentrasi sampai 60%wt. • Sangat selektif terhadap H₂S. • 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. Oleh karena itu pelarut ini biasanya digunakan untuk absorpsi gas CO₂ tanpa adanya H₂S. • Harganya paling mahal di antara pelarut amin lainnya.

Sumber: Kohl & Nielsen, 1997: 49-54 ; Kidnay, 2006: 98-99

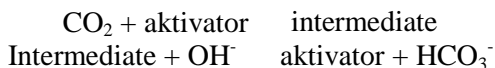
Pada penelitian ini akan digunakan DEA yang memiliki tingkat reaktivitas terhadap CO₂ yang cukup baik namun tidak terlalu baik dalam regenerasi CO₂. Penambahan aktivator seperti piperazin (PZ) dan arginin pada DEA agar memiliki tingkat reaktivitas terhadap CO₂ yang lebih baik dan mampu digunakan dalam mengabsorpsi gas dengan kandungan CO₂ yang tinggi serta dapat meningkatkan proses regenerasi CO₂.

II.9 Aktivator yang digunakan dalam Absorpsi CO₂

DEA salah satu pelarut yang sering digunakan karena sifat yang memiliki kapasitas absorpsi besar, kebutuhan energi regenerasi rendah, kemampuan terdegradasi kecil dan pengaruh korosi kecil tetapi laju reaksi dengan CO₂ tidak cukup baik sehingga diperlukan penambahan aktivator. Biasanya aktivator

ditambahkan dalam jumlah yang sedikit dikarenakan biayanya sangat mahal dibandingkan dengan pelarut utama. Karena rendahnya laju reaksi pemisahan CO₂ oleh *alkanolamine*, maka dibutuhkan sejumlah aktivator untuk meningkatkan proses absorpsi. Senyawa kimia yang dapat digunakan untuk meningkatkan laju reaksi seperti piperazin (PZ) dan arginin.


Mekanisme reaksi dari larutan teaktivasi secara umum sebagai berikut :



Efek dari aktivator tersebut dapat dijelaskan dengan baik dalam istilah katalis homogen. Reaksi meningkat karena laju hidrasi dari karbon dioksida menjadi asam karbonat meningkat. Juga terdapat perubahan pH menuju sisi asam dalam tahap regenerasi, yang menghasilkan daya absorpsi karbon dioksida yang lebih baik.

Salah satu campuran larutan amin sebagai aktivator adalah piperazin (PZ) yang digunakan sebagai kombinasi dengan DEA. Kemampuan larutan aktivasi dalam menghilangkan karbon dioksida ditentukan oleh kesetimbangan larutan dan juga transfer massa serta karakteristik kinetiknya. Karakteristik dari PZ dijelaskan pada **Tabel II.4** berikut.

Tabel II.4 Karakteristik Piperazin (PZ)

Sinonim :	<i>Piperazine Anhydrous, Diethylenediamine</i>
Rumus Molekul :	C ₄ H ₁₀ N ₂
Berat	86,13
Nomor Register :	110-85-0
Densitas	146
<i>Melting point</i> :	108-112°C
<i>Boiling point</i> :	145-146°C
<i>Flash point</i> :	82°C
Struktur	

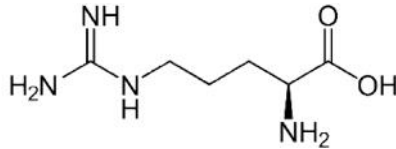
Sumber : Rob Lensen, 2004 : 12

Mekanisme reaksi PZ dalam mengikat CO₂ sebagai berikut.



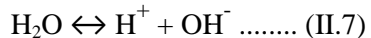
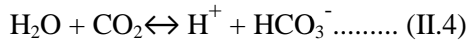
Dalam proses aktivasinya, PZ mengikat CO₂ membentuk karbamat dan karbamat tersebut mengubah CO₂ menjadi bikarbonat. Sementara itu, PZ sendiri teregenerasi ke bentuk semula dalam reaksi.

Selain daripada PZ, aktivator lain yang digunakan adalah Arginin. Arginin adalah suatu asam amino esensial yang memiliki kelompok guanidium bermuatan positif. Arginin mengandung grup amino primer dan guanidium grup pada rantai sampingnya. Amino grup primer (arginin) dan amina sekunder (DEA) diprediksi dapat bereaksi dengan CO₂ dengan cara yang sama. Berikut adalah struktur kimia dari Arginin (C₆H₁₄N₄O₂)



Gambar II.11 Struktur kimia Arginin

Reaksi antara MDEA dan CO₂ dapat ditulis sebagai berikut (Teerawat Sema, 2012):

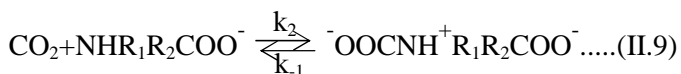


Asam amino terbagi menjadi tiga keadaan fisik yakni asam, *zwitterionic* dan basis atau deprotonasi. Untuk keadaan asam dan *zwitterionic* asam amino kurang reaktif terhadap CO₂ dari pada keadaan deprotonasi. Deprotonasi asam amino dapat dilakukan

dengan menambahkan basa kuat sesuai dengan jumlah equimolarnya. Basa yang digunakan umumnya KOH dimana berdisosiasi penuh terhadap air. Adapun deprotonasi dari *zwitterion* asam amino dapat ditulis sebagai berikut (Hendy Thee, 2013):



Beberapa peneliti (Holst dkk, 2009; Vaidya dkk, 2010; Kim dkk, 2012; Paul dan Thomsen, 2012; Kumar dkk, 2003; Jing dkk, 2012) menunjukkan reaksi antara CO₂ dan asam amino yang telah diprotonasi.



Reaksi ini diikuti dengan penghilangan proton oleh suatu basa, B. Pada system ini seperti KR⁺NH₂, OH⁻, H₂O, dan asam amino yang telah diprotonasi.



II.10 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. Posisi penelitian ini lebih jelasnya dapat digambarkan melalui tabel *State of the Art* berikut :

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

Material/ Proses/ Pelarut	Penelitian	Hasil	Referensi
PP/ hibrid/ <i>novel</i> <i>absorption</i> <i>liquid</i>	Penelitian dilakukan pada skala <i>bench</i> untuk aplikasi di bidang biogas, antariksa, kesehatan, kelautan, dan efek gas rumah kaca.	Meningkatnya suhu pelarut (20 – 40°C) dan tekanan parsial CO ₂ dapat meningkatkan fluks CO ₂ . Sedangkan fluks CO ₂ menurun dengan meningkatnya CO ₂ <i>loading</i> pelarut. Penelitian ini menunjukkan hasil yang lebih efisien dan ekonomis jika dibandingkan dengan kolom konvensional.	Feron, dkk. (2002)
PVDF/ hibrid/ PZ dan TEA	Mempelajari absorpsi CO ₂ dengan campuran pelarut alkanolamina (PZ/TEA) dan kinetika reaksi CO ₂ dengan mencampurkan	Peningkatan konsentrasi pelarut dan tekanan parsial CO ₂ menunjukkan laju absorpsi CO ₂ yang semakin tinggi. Kapasitas absorpsi dari campuran PZ dan	Yeon, dkk. (2004)

Tabel II.4 Lanjutan.

Material/ Proses/ Pelarut	Penelitian	Hasil	Referensi
	PZ dan TEA pada variasi konsentrasi dan pada suhu 303 K – 382 K. Laju absorpsi juga diukur dengan pengaruh tekanan parsial dari CO ₂ di dalam liquid.	TEA dengan CO ₂ dipengaruhi oleh konsentrasi piperazin.	
PP/ simultan dalam dua modul terpisah/ poliamidoamina (PAMAM)	Dua modul terpisah untuk absorpsi-desorpsi menggunakan <i>novel solvent</i> dan gas helium sebagai <i>stripping gas</i> .	Kinerja kontaktor membran stabil dan material membran PP tidak terbasahi oleh pelarut.	Kosaraju, dkk. (2005)
PTFE/ simultan dalam dua modul terpisah/ air	Absorpsi desorpsi dilakukan dengan kondisi operasi yang berbeda untuk mengetahui pengaruhnya terhadap efisiensi pemisahan gas CO ₂ .	Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi pemisahan CO ₂ menunjukkan kenaikan yang signifikan dengan menaikkan suhu pelarut. Namun, meningkatkan laju alir pelarut akan menurunkan fluks desorpsi CO ₂ .	Mansourizadeh, dkk. (2011)

Tabel II.4 Lanjutan.

Material/ Proses/ Pelarut	Penelitian	Hasil	Referensi
PVDF/ simultan dalam dua modul terpisah/ larutan garam asam amino	Membandingkan penggunaan empat macam larutan garam asam amino yang berbeda sebagai pelarut dengan larutan MEA dan NaOH terhadap performansi absorpsi/desorpsi CO ₂ .	Performansi absorpsi dapat ditingkatkan dengan kenaikan laju alir pelarut. Namun laju alir gas memberikan hasil yang berbanding terbalik dengan efisiensi pemisahan, walaupun dapat meningkatkan fluks. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa larutan garam asam amino tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan dengan perubahan suhu terhadap performansi absorpsi.	Rahim, dkk. (2015)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Garis Besar Penelitian

Garis besar pelaksanaan penelitian ini dilakukan secara eksperimen. Penelitian dilakukan di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, Departemen Teknik Kimia, FTI-ITS. Penelitian kontaktor membran untuk proses absorpsi dan desorpsi CO₂ menggunakan variasi pelarut amin teraktivasi bertujuan antara lain, pertama mempelajari pengaruh variasi jenis pelarut terhadap proses absorpsi dan desorpsi CO₂, kedua mempelajari pengaruh parameter operasi laju alir gas umpan terhadap laju perpindahan massa CO₂ (fluks absorpsi) dan efisiensi pemisahan absorpsi CO₂, ketiga mempelajari pengaruh parameter operasi suhu pelarut terhadap laju perpindahan massa CO₂ (fluks desorpsi) dan efisiensi pemisahan desorpsi CO₂, dan keempat mempelajari kinerja absorpsi-desorpsi kontaktor membran pada sistem kontinyu terhadap laju perpindahan massa CO₂ dan efisiensi pemisahan CO₂.

Material membran yang digunakan adalah membran serat berongga polipropilena. Pelarut yang digunakan untuk proses absorpsi CO₂ adalah (a) senyawa golongan amin sekunder yaitu *Diethanolamine* (DEA) dan (b) DEA teraktivasi dengan aktivatornya piperazin (PZ) dan arginin. Pada proses absorpsi, campuran gas mengandung 40% volume CO₂ (*balance* N₂) dialirkan ke bagian *shell* kontaktor membran dengan laju alir bervariasi antara 200 hingga 600 ml/menit dan pelarut dialirkan melalui pompa ke bagian *tube* kontaktor membran dengan laju alir 100 ml/menit. Gas yang keluar dari bagian *shell* disebut sebagai *sales gas*. Sedangkan pelarut yang keluar dari kontaktor membran yang kaya akan CO₂ (*rich amine*) ditampung untuk proses desorpsi. Pada proses desorpsi *rich amine* dialirkan dengan pompa ke bagian *tube* modul kontaktor membran desorpsi yang sebelumnya divariasikan suhu masuknya dengan cara pemanasan

antara 30 hingga 70 °C. Gas CO₂ dalam pelarut berdifusi melewati pori membran dan akan terpisah dari pelarut melalui bagian *shell* dengan bantuan pompa vakum. Sedangkan pelarut yang mengandung sedikit CO₂ (*lean amine*) keluar dari bagian *tube* modul kontaktor membran desorpsi.

Waktu operasi ditentukan selama 15 menit baik untuk proses absorpsi maupun desorpsi dimana laju alir gas dan konsentrasi gas keluar sudah dianggap konstan (*steady state*). Untuk setiap variabel dilakukan pengambilan sampel *sales gas*, *rich amine*, dan *lean amine*. Sampel kemudian dianalisa menggunakan titrasi *chiitck* dengan pelarut HCl 1 M dan *methyl orange* sebagai indikator. Hasil analisa diperoleh berupa volume HCl dan volume CO₂ yang kemudian digunakan untuk menghitung laju perpindahan CO₂ (fluks), efisiensi pemisahan CO₂ dan CO₂ *loading*.

III.2 Bahan yang Digunakan

Dalam penelitian ini, material membran yang digunakan adalah membran hidrofobik polipropilena yang diperoleh dari GDP Filter-Indonesia dengan spesifikasi karakteristik membran disajikan dalam **Tabel III.1**. Konsentrasi gas CO₂ yang masuk ke modul membran 40% (*balance N₂*) yang diperoleh dari PT. Samator Gas. Selanjutnya untuk pelarut yang digunakan untuk proses absorpsi CO₂ adalah DEA dengan aktivatornya, piperazin (PZ) dan arginin.

Tabel III.1 Spesifikasi 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)	80
Jumlah fiber absorpsi	3302
Jumlah fiber desorpsi	3302
Porositas	0,65

III.3 Variabel Penelitian

III.3.1 Variabel Tetap

1. Konsentrasi pelarut = 30% berat
2. Konsentrasi aktivator = 1% berat
3. Laju alir pelarut = 100 (ml/min)
4. Konstrasi CO₂ dalam gas umpan 40% volume (*balance* N₂)
5. Tekanan vakum modul kontaktor membran desorpsi 20 kPa

III.3.2 Variabel Berubah

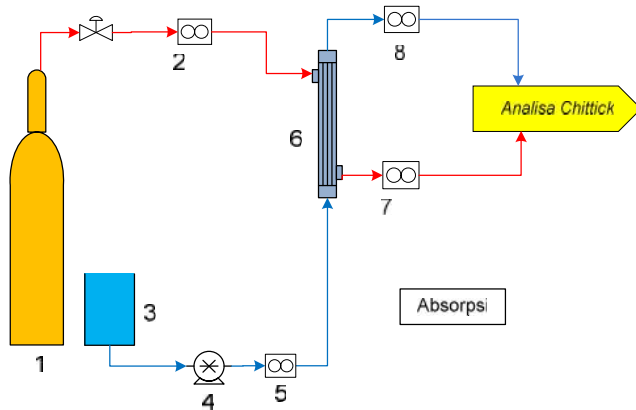
1. Laju alir gas umpan absorpsi = 200, 300, 400, 500, 600 (ml/min)
2. Suhu pelarut masuk desorpsi = 30, 40, 50, 60, 70 (°C)
3. Jenis pelarut (DEA tunggal, DEA-PZ dan DEA-arginin)

III.3.3 Variabel Respon

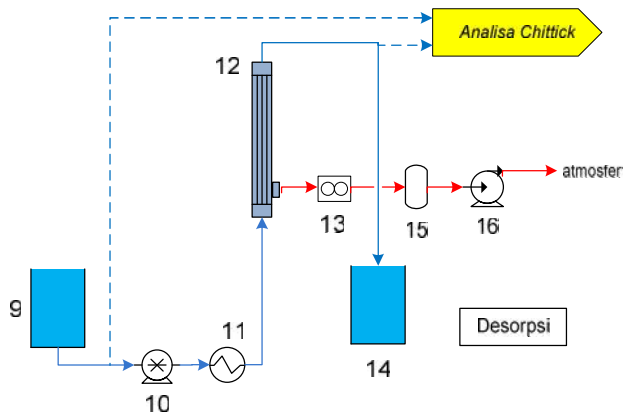
1. Laju absorpsi dan desorpsi (Fluks)
2. Efisiensi pemisahan CO₂ (CO₂ *removal*)
3. CO₂ *loading*

III.4 Rangkaian Alat Penelitian

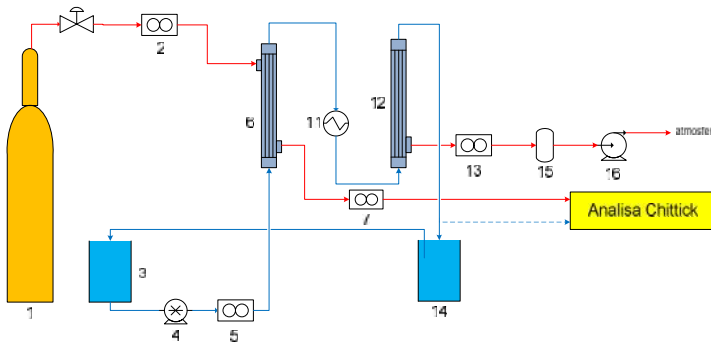
Pada penelitian ini, modul kontaktor membran akan dibuat sesuai dengan konsep pada **Gambar III.1**, **Gambar III.2** dan **Gambar III.3**.



Gambar III.1 Rangkaian alat kontaktor membran untuk proses absorpsi CO₂



Gambar III.2 Rangkaian alat kontaktor membran untuk proses desorpsi CO₂



Gambar III.3 Rangkaian alat proses absorpsi-desorpsi CO₂ secara kontinyu untuk uji kinerja kontaktor membran

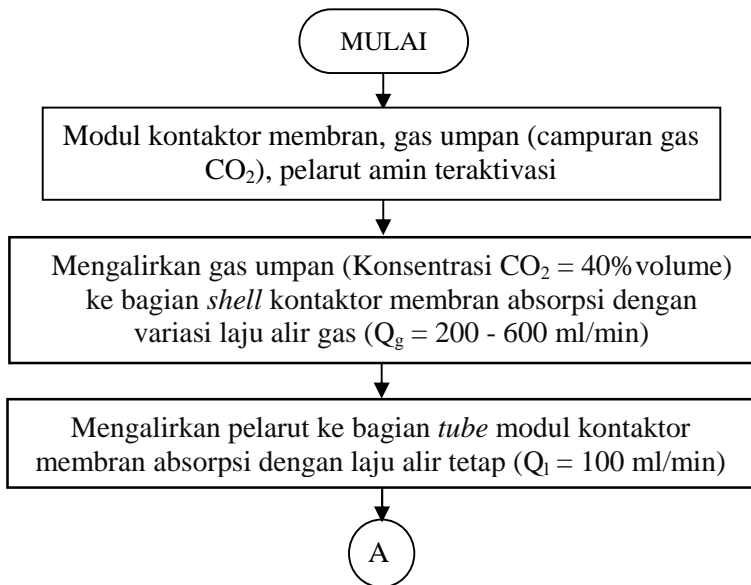
Keterangan :

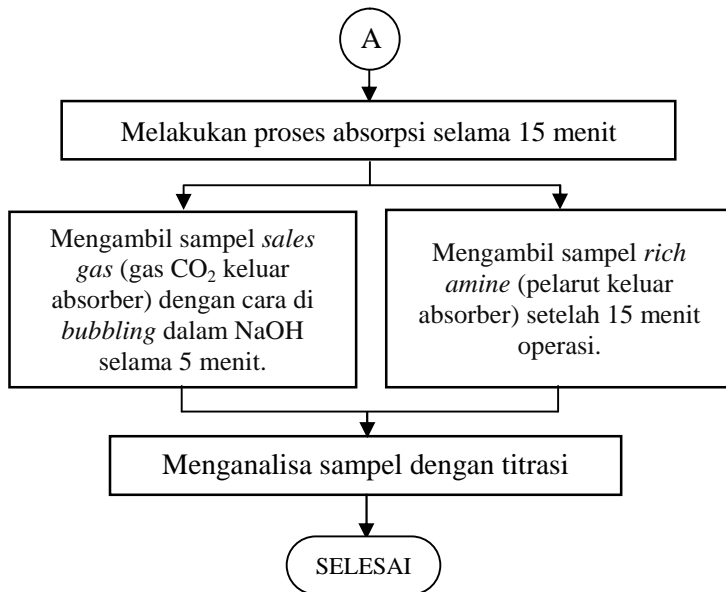
- 1 : Tabung gas CO₂ – N₂
- 2 : Flowmeter gas CO₂ – N₂ masuk absorpsi
- 3 : Tangki pelarut murni
- 4 : Pompa pelarut masuk absorpsi
- 5 : Flowmeter pelarut masuk absorpsi
- 6 : Modul kontaktor membran absorpsi
- 7 : Flowmeter *sales gas* keluaran absorpsi
- 8 : Flowmeter *rich amine* keluaran absorpsi
- 9 : Tangki pelarut kaya akan CO₂
- 10 : Pompa pelarut kaya akan CO₂ masuk desorpsi
- 11 : Pemanas
- 12 : Modul kontaktor membran desorpsi
- 13 : Flowmeter gas CO₂ keluar desorpsi
- 14 : Tangki penampung pelarut keluran desorpsi
- 15 : *Buffering tube (silica gel)*
- 16 : Pompa vakum

III.5 Prosedur Penelitian

III.5.1 Proses Absorpsi CO₂

Pada tahapan proses absorpsi (**Gambar III.4**), gas umpan yang mengandung CO₂ (*balance* N₂) dialirkan dengan laju alir gas 200-600 ml/min melalui bagian *shell* membran dimana laju alir gas diukur menggunakan *flowmeter*, sedangkan pelarut dialirkan menggunakan pompa ke bagian *tube* dengan laju alir masuk 100 ml/min secara *counter-current* terhadap aliran gas masuk. Perpindahan massa gas CO₂ terjadi saat gas CO₂ dari gas umpan berdifusi melewati pori membran dan kemudian gas CO₂ larut didalam pelarut. Gas yang keluar dari bagian *shell* membran disebut dengan *sales gas* sedangkan pelarut keluar membran disebut *rich amine* dan dianalisa menggunakan *chittck*. Hasil analisa berupa volume HCl dan volume CO₂ yang kemudian digunakan untuk menghitung laju perpindahan CO₂ (fluks), efisiensi pemisahan CO₂ dan CO₂ loading.



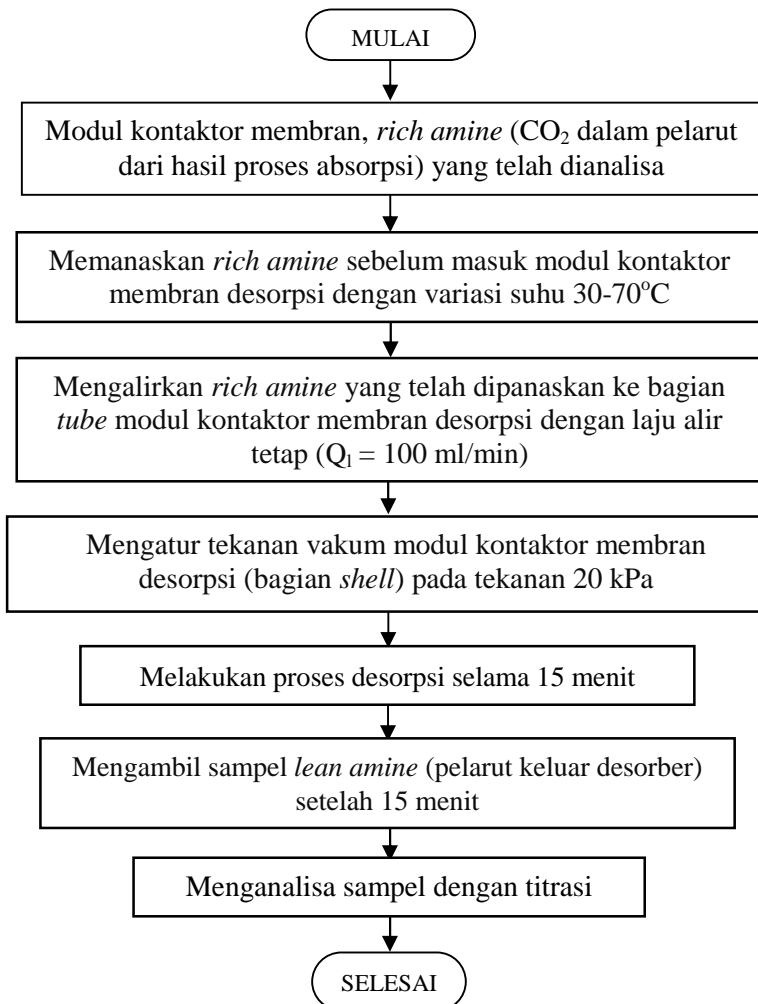


Gambar III.4 Diagram Alir Proses Absorpsi CO₂ menggunakan Kontaktor Membran

III.5.2 Proses Desorpsi CO₂

Pada tahapan proses desorpsi (**Gambar III.5**), pelarut kaya akan gas CO₂ (*rich amine*) yang keluar dari modul kontaktor membran absorpsi dialirkan menggunakan pompa masuk ke dalam bagian *tube* kontaktor membran desorpsi dengan memvariasikan suhu masuk. Pemanasan ini bertujuan untuk menurunkan kelarutan CO₂ di dalam pelarut sehingga CO₂ dapat terpisah dari pelarut dan berdifusi keluar melewati pori membran melalui bagian *shell* dan dibantu dengan pompa vakum. Pelarut yang mengandung sedikit CO₂ (*lean amine*) keluar melalui bagian *tube* kontaktor membran desorpsi untuk digunakan kembali sebagai pelarut dalam proses absorpsi. Konsentrasi CO₂ dalam pelarut dianalisa menggunakan titrasi *chittick* dengan HCl 1 M. Hasil analisa sama halnya dengan proses absorpsi berupa volume HCl dan volume CO₂ yang

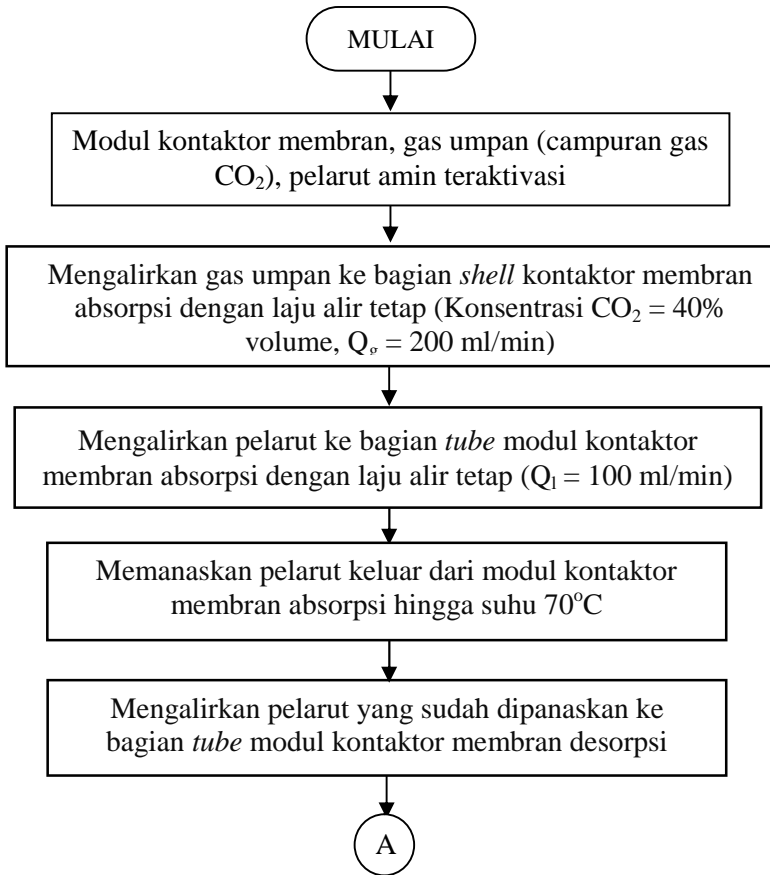
kemudian digunakan untuk menghitung laju perpindahan CO₂ (fluks), efisiensi pemisahan CO₂ dan CO₂ loading.

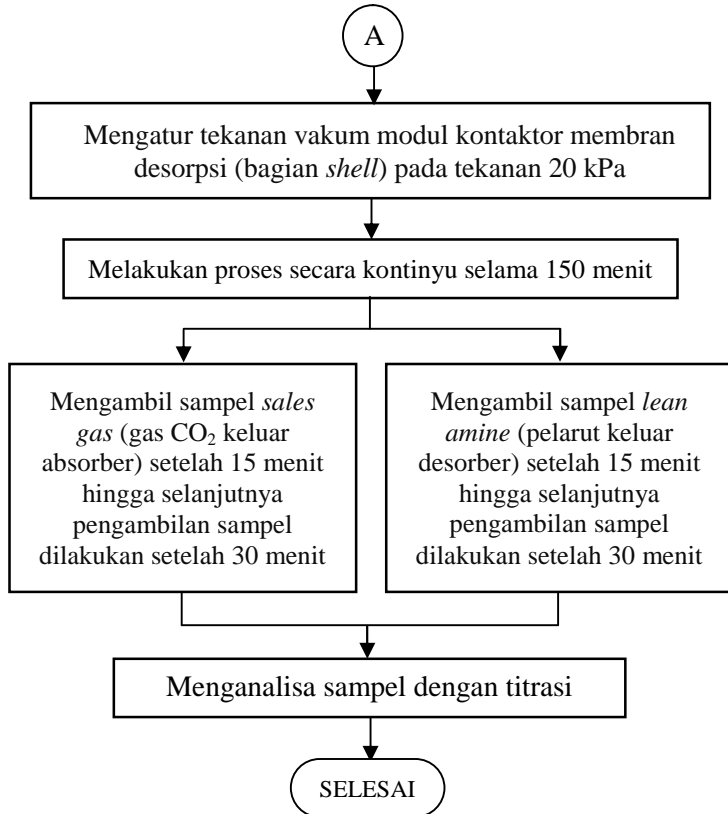


Gambar III.5 Diagram Alir Proses Desorpsi CO₂ menggunakan Kontaktor Membran

III.5.3 Proses Absorpsi-Desorpsi CO₂ secara Kontinyu

Pada proses ini, proses absorpsi CO₂ dan desorpsi CO₂ dilakukan secara kontinyu selama 150 menit. Parameter laju alir pelarut dan suhu pelarut yang digunakan ditentukan dari hasil kondisi operasi terbaik pada percobaan absorpsi dan desorpsi yang dilakukan secara terpisah. Langkah-langkah proses dijelaskan dalam diagram alir pada **Gambar III.6**.





Gambar III.6 Diagram Alir Penelitian Absorpsi-Desorpsi secara Kontinyu

III.6 Prosedur Analisa Hasil Penelitian

Analisa hasil pada percobaan ini adalah analisa konsentrasi gas CO₂ di dalam gas dan pelarut. CO₂ yang terkandung dalam gas umpan dianalisa menggunakan *gas chromatography*, sedangkan konsentrasi CO₂ yang terkandung dalam *sales gas* dan pelarut dianalisa menggunakan titrasi *chittick*. Kandungan CO₂ dalam *sales gas* dan pelarut digunakan untuk menentukan laju perpindahan massa CO₂ (fluks), efisiensi pemisahan CO₂ dan CO₂ *loading*.

III.6.1 Analisa Laju Perpindahan Massa CO₂ (Fluks) dan Efisiensi Pemisahan CO₂ pada Modul Kontaktor Membran

Konsentrasi gas CO₂ dari hasil analisa digunakan untuk menghitung fluks atau laju perpindahan massa CO₂ (J_{CO_2}) dan menghitung efisiensi pemisahan CO₂ (y) dengan menggunakan persamaan yang digunakan oleh (Rahim, dkk. 2015). Persamaan fluks absorpsi :

$$J_{CO_2} = \frac{Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}}{A} \dots\dots\dots(III.1)$$

dimana J_{CO_2} adalah fluks absorpsi dalam (mol/m².detik), Q_{in} dan Q_{out} adalah laju alir gas CO₂ masuk dan laju alir gas CO₂ keluar (m³/detik), C_{in} dan C_{out} adalah konsentrasi *inlet* dan *outlet* dari gas CO₂ (mol/m³), A adalah luas permukaan membran (m²). Sedangkan untuk fluks desorpsi :

$$J'_{CO_2} = \frac{(C'_{in} - C'_{out}) \times Q_l}{A} \dots\dots\dots(III.2)$$

J'_{CO_2} adalah fluks desorpsi dalam (mol/m².s), C'_{in} dan C'_{out} adalah konsentrasi CO₂ *inlet* dan *outlet* dalam fase liquid (mol/m³), dan Q_l adalah laju alir pelarut (m³/detik). Persamaan efisiensi absorpsi CO₂ :

$$y = \frac{Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}}{Q_{in} \times C_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(III.3)$$

Persamaan efisiensi desorpsi CO₂ :

$$y = \frac{C'_{in} - C'_{out}}{C'_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(III.4)$$

III.6.2 Analisa CO₂ Loading dalam Pelarut Keluar Modul Kontaktor Membran

Konsentrasi CO₂ di dalam pelarut ditentukan dengan analisa titrasi *chittick*, skema alat ditunjukkan oleh **Gambar III.5**. Labu erlenmeyer (2) berisi sampel pelarut dengan indikator (*methyl orange*) dihubungkan dengan dua

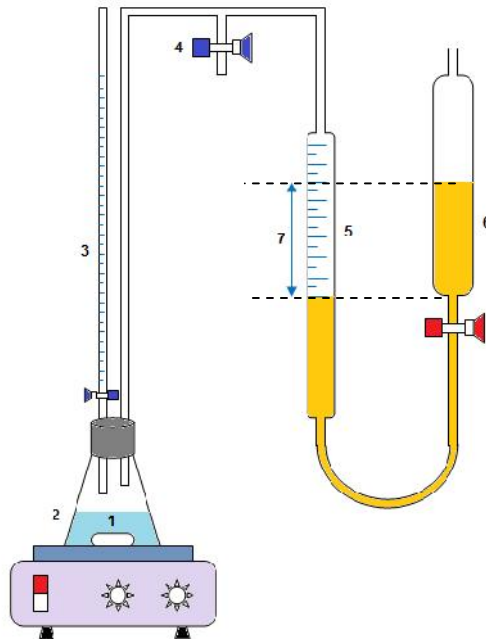
saluran dan ditempatkan dalam pengaduk magnetik (1). Sambungan pertama dihubungkan dengan buret (3) untuk titrasi dan sambungan kedua dihubungkan dengan U-tube manometer. Sampel pelarut ditrasi dengan larutan HCl (1 M) dari tabung buret hingga warna sampel pelarut berubah. CO₂ yang terlepas dari sampel ditangkap oleh larutan garam NaCl jenuh yang ada di *levelling bulb* (6) melalui U-tube. Jumlah CO₂ yang terlepas tersebut dapat diketahui berapa jumlahnya dari perubahan volume yang ditunjukkan oleh *measuring burette* (7).

Konsentrasi CO₂ dalam pelarut, biasa disebut dengan CO₂ loading, ditentukan dengan persamaan :

$$r = \frac{\text{mol}(\text{CO}_2)}{\text{mol}(\text{pelarut})} = \left[\frac{(V_{\text{gas}} - V_{\text{HCl}})(P)(273K)}{(101325\text{Pa})(T)(22,4\text{L/mol})} \right] \dots(\text{III.6})$$

(Zhang, dkk. 2013)

dimana V_{gas} adalah perubahan volume larutan NaCl jenuh yang ditunjukkan oleh *measuring burette* (mL), V_{HCl} adalah volume HCl yang diperlukan sampai sampel pelarut berubah warna (mL), P adalah tekanan operasi (Pa), T adalah suhu operasi (K), C₁ adalah konsentrasi pelarut (mol/L), dan V₁ adalah volume sampel pelarut (mL).



Gambar III.5 Skema alat titrasi *chittick*

Keterangan :

- 1 : Pengaduk magnetik
- 2 : Erlenmeyer
- 3 : Buret
- 4 : *Venting valve*
- 5 : *Measuring burette*
- 6 : *Levelling bulb* (garam NaCl jenuh)
- 7 : Volume CO₂ terbaca

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh variasi jenis pelarut pada proses absorpsi dan desorpsi CO₂ menggunakan kontaktor membran, mempelajari pengaruh parameter operasi yaitu laju alir gas umpan pada proses absorpsi dan suhu pelarut masuk proses desorpsi terhadap laju perpindahan massa (fluks), efisiensi pemisahan CO₂ dan CO₂ loading. Selain untuk mengetahui jenis pelarut dan parameter operasi terbaik, penelitian ini juga dilakukan untuk pengujian kinerja membran terhadap waktu dimana proses absorpsi dan desorpsi dilakukan secara simultan yaitu *rich amine* keluaran kontaktor membran absorpsi dialirkan secara langsung masuk ke kontaktor membran desorpsi. Parameter operasi dan pelarut yang terbaik akan dipilih berdasarkan laju perpindahan massa dan efisiensi pemisahan CO₂ dan CO₂ loading dalam absorpsi dan desorpsi CO₂. Prinsip dari proses absorpsi menggunakan kontaktor membran adalah adanya gaya pendorong (*driving force*) perbedaan konsentrasi sehingga mendorong difusi gas CO₂ melalui pori membran dari konsentrasi yang tinggi ke konsentrasi yang rendah yaitu berpindahannya gas CO₂ dari fasa gas dan larut ke dalam fasa cairan. Sedangkan prinsip proses desorpsi adalah membuat CO₂ yang telah larut dalam fasa cairan terlepas berdifusi melalui pori membran menjadi fasa gas. Sampel *sales gas* dan pelarut *amine* diambil dan dianalisa menggunakan *titrasi chittick*. Respon yang diukur untuk ketiga tujuan penelitian ini adalah laju perpindahan massa (fluks) absorpsi dan desorpsi CO₂, efisiensi pemisahan CO₂ dan CO₂ loading.

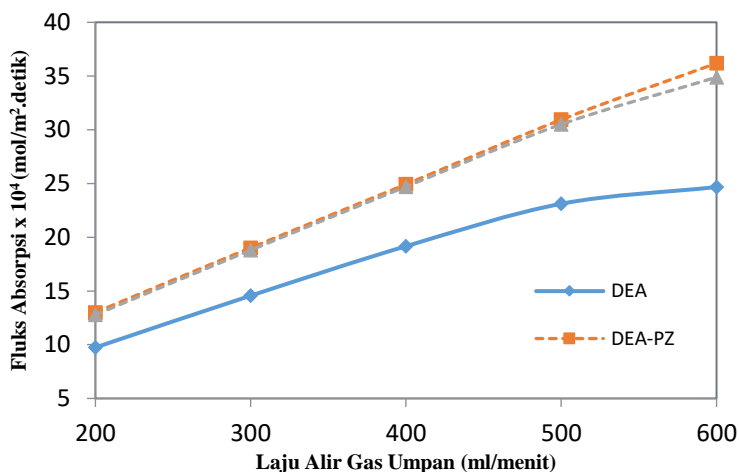
IV.1 Proses Absorpsi

IV.1.1 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Laju Perpindahan Massa CO₂ (Fluks) Absorpsi

Salah satu parameter operasi dalam percobaan ini adalah laju alir gas umpan masuk kontaktor membran absorpsi, dimana laju alir gas umpan akan memberikan pengaruh terhadap laju perpindahan massa CO₂ (fluks). Hasil percobaan menunjukkan

pengaruh laju alir gas umpan terhadap laju perpindahan massa CO₂ (fluks) disajikan dalam **Gambar IV.1**.

Gambar IV.1 menunjukkan bahwa semakin besar laju alir gas umpan maka fluks absorpsi CO₂ semakin meningkat untuk ketiga jenis pelarut yang berbeda. Hal ini disebabkan karena lapisan film di bagian gas menjadi lebih tipis dengan bertambahnya laju alir gas sehingga hambatan perpindahan massa CO₂ di bagian sisi gas mengalami penurunan dan memudahkan CO₂ berdifusi melewati pori membran dari fasa gas ke sisi fasa cairan. (Al-Marzouqi, dkk. 2009).

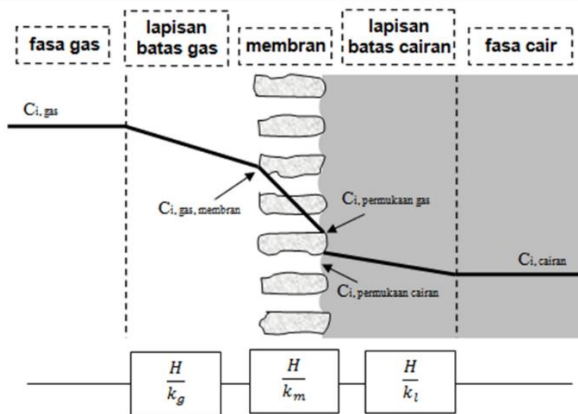


Gambar IV.1 Pengaruh laju alir gas umpan terhadap fluks absorpsi CO₂ pada berbagai jenis pelarut (CO₂ : 40% vol ; Q_{pelarut}= 100 ml/menit ; T= 303,15 K ; P=101 kPa)

Hasil penelitian yang didapatkan mengenai pengaruh laju alir gas umpan terhadap fluks absorpsi CO₂ juga dibuktikan melalui penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Rahim, dkk. (2015), yang menjelaskan bahwa laju alir gas umpan yang semakin tinggi dapat secara efektif meningkatkan laju perpindahan massa CO₂ (fluks absorpsi) di bagian sisi gas yang kemudian meningkatkan perpindahan massa CO₂ melalui membran. Proses

absorpsi terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi antara fasa gas dan fasa cairan dimana gas umpan yang memiliki konsentrasi CO₂ lebih tinggi akan berdifusi melalui pori membran, kemudian larut dalam pelarut (absorben) ke dalam pelarut.

Profil konsentrasi gas CO₂ pada saat terjadinya absorpsi diilustrasikan pada **Gambar IV.2**. Terdapat tiga hambatan dalam proses perpindahan massa CO₂ dengan kontaktor membran yaitu hambatan pada fasa gas, hambatan pada pori membran dan hambatan pada fasa cairan.



Gambar IV.2 Profil konsentrasi gas CO₂ pada perpindahan massa gas CO₂ dari fasa gas ke fasa cairan

Ketika komponen CO₂ di dalam gas campuran berdifusi melalui pori membran menuju fasa cairan, reaksi kimia CO₂-Pelarut terjadi dalam sistem. Untuk proses absorpsi CO₂ menggunakan pelarut DEA-H₂O, reaksi kimia yang terjadi antara CO₂ dengan DEA menghasilkan karbamat dan DEA terprotonasi.



Dalam reaksi (IV.1) proses pembentukan karbamat terjadi dalam dua tahapan yaitu :

- Pembentukan *zwitterion* sebagai produk antara (*intermediate*)



- Penghilangan proton oleh basa B



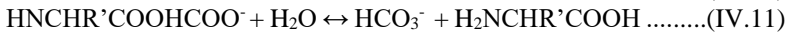
Dimana basa B bisa berupa amin itu sendiri, molekul air atau ion hidroksil yang bereaksi dalam larutan DEA :



Laju perpindahan massa CO₂ (fluks) dengan larutan DEA teraktivasi secara signifikan lebih tinggi daripada larutan DEA tidak teraktivasi berdasarkan **Gambar IV.1**. Hal ini dikarenakan peran aktivator yang bergerak bebas antara lapisan batas cairan dengan fasa cairan sebagai pembawa CO₂ yang akan meningkatkan laju perpindahan massa CO₂ (Lu, dkk. 2007). Selain itu kebanyakan CO₂ hanya bereaksi dengan aktivator yang memiliki reaktivitas kimia tinggi. Lebih jelasnya dengan penambahan PZ menghasilkan laju perpindahan massa CO₂ (fluks) lebih besar dibandingkan dengan dengan penambahan Arginin, dihasilkan fluks yaitu sebesar 36,19 x 10⁻⁴ mol/m².s pada laju alir gas umpan tertinggi 600 ml/menit. Dalam proses aktivasinya, PZ mengikat CO₂ membentuk karbamat dan melalui proses hidrolitik karbamat tersebut mengubah CO₂-nya menjadi bikarbonat. Sementara itu, PZ sendiri teregenerasi ke bentuk semula dalam reaksi.



Berbeda dengan Arginin yang mengikat CO₂ untuk menghasilkan produk *zwitterion* terlebih dahulu kemudian *zwitterion* tersebut terurai menjadi karbamat yang selanjutnya terhidrolisa membentuk ion bikarbonat dan senyawa Arginin semula.



Dari mekanisme reaksi diatas dapat dinyatakan bahwa tahapan aktivasi arginin lebih panjang daripada PZ. Sebagai hasilnya laju perpindahan massa CO₂ dengan Arginin lebih rendah daripada PZ. Hal ini bisa terjadi karena PZ memiliki struktur

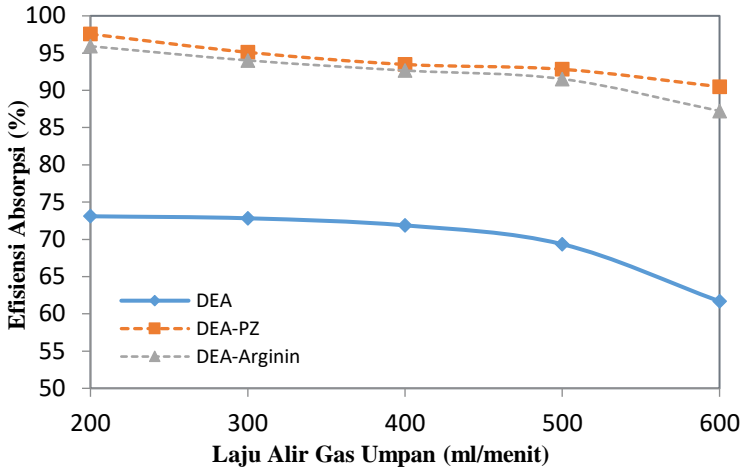
molekul khusus dimana terdapat struktur siklik diamino simetris yang mengkatalisis reaksi hidrolisis CO₂ dalam karbamat menjadi ion bikarbonat (Bishnoi, dkk. 2002).

Larutan amin dengan penambahan PZ merupakan larutan basa lemah dan adanya PZ yang mengkatalisis proses ekstraksi proton dalam mekanisme reaksi amin dengan CO₂ menghasilkan kesetimbangan reaksi kimia bergeser ke arah kanan sehingga meningkatkan kinetika reaksi. Selain itu PZ juga bereaksi dengan CO₂ bertindak sebagai amin sekunder, hal tersebut merupakan reaksi cepat *pseudo-first-order* secara paralel dengan reaksi amin primer DEA dengan CO₂ (Anna, dkk. 2012).

IV.1.2 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Efisiensi Pemisahan Absorpsi CO₂

Pengaruh laju alir gas umpan terhadap efisiensi pemisahan CO₂ ditunjukkan dalam **Gambar IV.3**, dimana pada konsentrasi gas umpan 40.89 % CO₂ (*balance* N₂), grafik menunjukkan kecenderungan efisiensi pemisahan yang menurun seiring bertambahnya laju alir gas umpan. Hasil percobaan pada laju alir pelarut yang tetap dengan laju alir gas umpan yang bervariasi antara 200-600 mL/menit, menunjukkan bahwa semakin besar laju alir gas umpan menyebabkan efisiensi pemisahan gas CO₂ semakin menurun.

Hasil percobaan yang sama juga didapatkan melalui penelitian sebelumnya oleh Lv, dkk. (2012) bahwa kenaikan laju alir gas umpan memberikan pengaruh yang berbanding terbalik dengan efisiensi pemisahan gas CO₂ karena semakin cepat laju alir gas umpan menyebabkan waktu tinggal dari gas umpan menjadi lebih singkat. Waktu tinggal gas umpan di dalam modul membran yang singkat akan mempercepat waktu kontak antara gas dan permukaan membran sehingga menurunkan jumlah CO₂ yang berdifusi dari fasa gas melalui pori membran menuju fasa cairan. Hal ini berpengaruh terhadap efisiensi pemisahan CO₂ pada proses absorpsi yang juga semakin turun.



Gambar IV.3 Pengaruh laju alir gas umpan terhadap efisiensi pemisahan CO₂ pada berbagai jenis pelarut (CO₂ 40% volume ; Q_{pelarut}= 100 ml/menit)

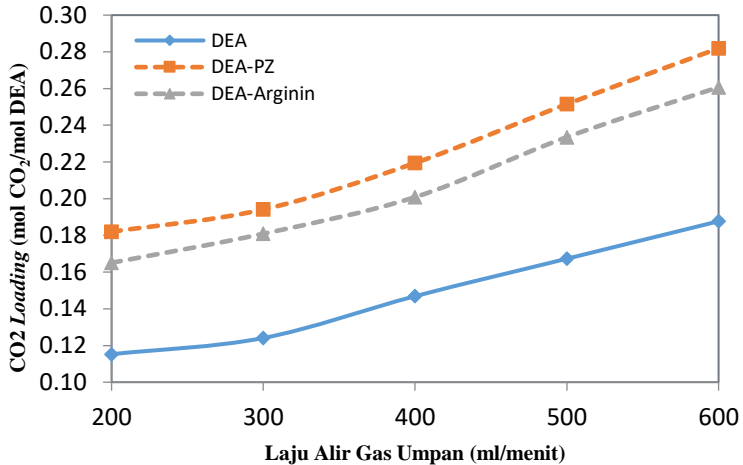
Gambar IV.3 menunjukkan bahwa DEA teraktivasi memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan DEA yang tidak teraktivasi. Aktivator PZ dan Arginin meskipun dalam jumlah yang sedikit di dalam larutan dapat secara efektif meningkatkan kinerja absorpsi CO₂ pada kontaktor membran. Lebih rincinya dalam **Gambar IV.3** aktivasi PZ lebih tinggi dibandingkan Arginin menghasilkan efisiensi pemisahan tertinggi yaitu 97,55 % pada laju alir gas umpan 200 ml/menit. Hal tersebut terjadi dikarenakan beberapa faktor sesuai dengan penjelasan pada Subbab **IV.1.1** dimana tahapan mekanisme reaksi DEA-PZ lebih singkat dibandingkan dengan tahapan mekanisme reaksi DEA-Arginin.

IV.1.3 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO₂ loading

CO₂ loading didefinisikan sebagai jumlah mol CO₂ yang diserap per mol pelarut. Sulaiman, dkk (1998) meneliti tentang analisa data kesetimbangan dari CO₂ di dalam larutan DEA, berdasarkan teori stoikiometri antara CO₂-DEA :



Hasil penelitian menyebutkan 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.



Gambar IV.4 Pengaruh laju alir gas umpan terhadap CO_2 loading pada berbagai jenis pelarut (CO_2 40% volume ; $Q_{\text{pelarut}} = 100$ ml/menit)

Gambar IV.4 menunjukkan pengaruh laju alir gas umpan terhadap CO_2 loading pada konsentrasi gas umpan 40% terhadap berbagai jenis pelarut. Dari grafik diketahui bahwa semakin tinggi laju alir gas umpan menyebabkan CO_2 loading semakin besar. Hal tersebut dikarenakan besarnya CO_2 loading dipengaruhi oleh besarnya fluks absorpsi CO_2 , semakin besar laju perpindahan massa CO_2 dari permukaan membran ke dalam pelarut (fluks absorpsi) mempengaruhi jumlah CO_2 yang terserap ke dalam pelarut semakin banyak.

Hasil penelitian menunjukkan nilai CO_2 loading tertinggi yaitu ketika menggunakan pelarut DEA-PZ yang mencapai 0,28 mol CO_2 /mol DEA. Nilai CO_2 loading dalam penelitian ini sesuai dengan penelitian Sulaiman, dkk. (1998), yang membuktikan

bahwa semakin besar fluks absorpsi maka semakin besar juga CO_2 loading pelarut dan menyebutkan kisaran CO_2 loading pada konsentrasi DEA 2 M berada pada nilai maksimum 0,5 mol CO_2 /mol DEA.

Tabel IV.1 Perbandingan Kelarutan Pelarut Hasil Penelitian (α)

Pelarut	Laju Alir Gas Umpan (ml/menit)				
	200	300	400	500	600
	α (CO_2 loading : mol CO_2 /mol DEA)				
DEA	0,12	0,12	0,15	0,17	0,19
DEA-PZ	0,18	0,19	0,22	0,25	0,28
DEA-Arginin	0,17	0,18	0,20	0,23	0,26

Nilai CO_2 loading yang didapat berdasarkan hasil penelitian dihubungkan dengan proses absorpsi yang dapat dikatakan sudah berjalan dengan baik karena besarnya nilai fluks absorpsi menunjukkan banyaknya CO_2 yang berhasil terserap oleh pelarut.

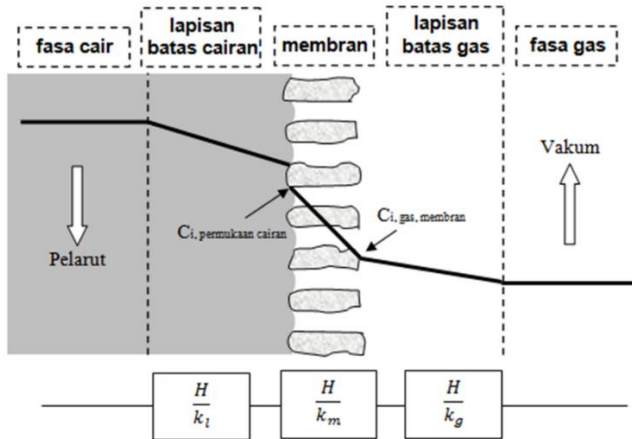
IV.2 Proses Desorpsi

IV.2.1 Pengaruh Suhu Pelarut terhadap Laju Perpindahan Massa CO_2 (Fluks) Desorpsi

Proses desorpsi merupakan proses terjadinya regenerasi terhadap pelarut dimana gas CO_2 yang terikat didalam pelarut terlepas sehingga pelarut dapat digunakan kembali sebagai absorbent. Dalam penelitian ini proses desorpsi dilakukan dengan variasi suhu pelarut masuk kontaktor membran desorpsi (*rich amine*) antara 30-70 °C. Upaya pemanasan yang dilakukan bertujuan agar CO_2 yang larut dalam fasa cairan mudah terlepas dari pelarut sehingga gas CO_2 dapat berdifusi melewati pori membran dan berpindah ke sisi fasa gas. Sebagaimana regenerasi suhu rendah akan menghasilkan kinetika reaksi yang juga rendah maka dalam penelitian ini diterapkan teknologi desorpsi atau regenerasi menggunakan bantuan vakum sebesar 20 kPa untuk meningkatkan kinetika desorpsi CO_2 . Beberapa peneliti

sebelumnya telah membuktikan bahwa hanya dengan teknologi regenerasi vakum tanpa menggunakan *sweeping gas*, gaya pendorong (*driving force*) perpindahan massa CO₂ dapat ditingkatkan dan proses regenerasi dapat berjalan (Teramoto, dkk. 2003; Kosaraju, dkk. 2005; Fang, dkk. 2007; Wang, dkk. 2013).

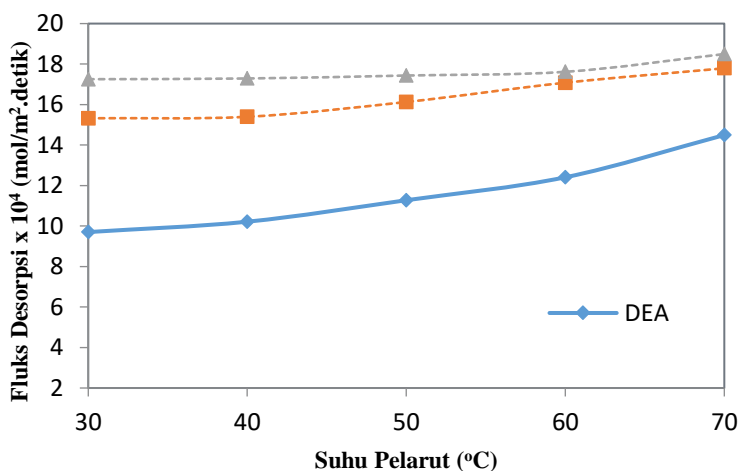
Profil konsentrasi gas CO₂ pada saat terjadinya desorpsi menggunakan teknologi regenerasi vakum diilustrasikan pada **Gambar IV.5**.



Gambar IV.5 Profil konsentrasi gas CO₂ pada perpindahan massa gas CO₂ dari fasa cairan ke fasa gas dengan bantuan vakum

Berdasarkan **Gambar IV.5** perpindahan massa CO₂ terjadi dari sisi fasa cairan yang berada dalam *tube* kontaktor membran desorpsi ke sisi fasa gas pada *shell* kontaktor membran desorpsi. Jika pori membran hidrofobik dan tidak terbasahi maka diasumsikan pori membran hanya diisi secara penuh oleh gas. Difusi CO₂ berawal dari fasa *bulk* cairan pelarut diikuti oleh difusi lapisan batas cairan dan atau reaksi kimia pada permukaan cairan-membran, difusi gas dalam pori membran terhadap dinding membran dan terakhir difusi terhadap fasa *bulk* gas. (Fang, dkk. 2012).

Gambar IV.6 menunjukkan hasil percobaan bahwa laju perpindahan massa CO₂ (fluks) desorpsi berbanding lurus dengan kenaikan suhu pelarut dimana dengan kenaikan suhu akan meningkatkan fluks desorpsi. Hal ini dikarenakan kelarutan CO₂ menurun sangat cepat dengan kenaikan suhu. Hasil ini juga telah dibuktikan oleh beberapa peneliti sebelumnya yang menyatakan bahwa laju reaksi akan meningkat sangat cepat seiring dengan kenaikan suhu (Michael, 2010; Khaisri, dkk. 2011, Mansourizadeh dan Ismail, 2011; Rahim, dkk. 2015).



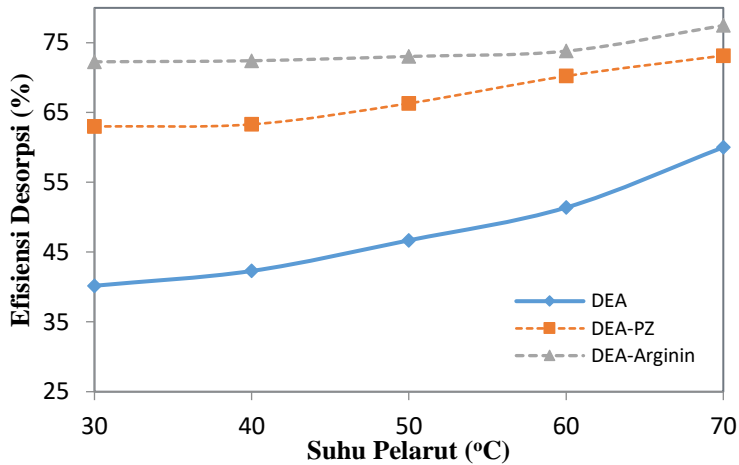
Gambar IV.6 Pengaruh suhu pelarut terhadap fluks desorpsi pada berbagai jenis pelarut ($Q_{\text{pelarut}} = 100$ ml/menit ; $P_{\text{vakum}} = 20$ kPa)

Seperti yang terlihat pada **Gambar IV.6** bahwa untuk pelarut yang teraktivasi khususnya DEA-Arginin menunjukkan fluks desorpsi yang lebih baik dibandingkan dengan DEA-PZ maupun larutan DEA tunggal yaitu mencapai $18,5 \times 10^{-4}$ mol/m².detik pada suhu pelarut 70 °C. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan kadar keasaman (pH) pelarut DEA-Arginin lebih rendah dibandingkan dengan pelarut DEA-PZ. Berdasarkan hasil penelitian pada suhu 28.4 °C diketahui bahwa pH untuk masing-

masing pelarut DEA-Arginin adalah 10,7, DEA-PZ adalah 11,34 dan DEA tunggal adalah 11,5. Dalam hal ini pH yang lebih rendah memiliki pengaruh dalam meningkatkan tekanan parsial CO₂ dalam berkesetimbangan dengan cairan yang menjadi gaya pendorong untuk terjadinya perpindahan massa dari cairan menuju pori membran. Selain itu pH yang lebih rendah juga meningkatkan laju reaksi hidrolisis karbamat menjadi ion *zwitterion*. Rendahnya pH larutan juga akan menggeser kesetimbangan reaksi CO₂ ke arah pembentukan dan pelepasan gas CO₂ seiring dengan meningkatnya tekanan parsial CO₂ (Majchrowicz, 2014).

IV.2.2 Pengaruh Suhu Pelarut terhadap Efisiensi Desorpsi

Pada **Gambar IV.7** menunjukkan grafik pengaruh suhu pelarut terhadap efisiensi desorpsi, dimana grafik tersebut menunjukkan kecenderungan dengan semakin tinggi suhu pelarut akan meningkatkan efisiensi desorpsi. Hasil yang sama juga didapatkan oleh peneliti sebelumnya (Yan dkk, 2012) yang melakukan penelitian desorpsi CO₂ menggunakan kontaktor membran polipropilen dan pelarut monoetanolamin (MEA) yang dibandingkan dengan pelarut *potassium glycinate* (PG) dan variasi suhu pelarut, Yan. dkk menyatakan bahwa seiring kenaikan suhu pelarut (40-70 °C), efisiensi kinerja regenerasi semakin meningkat. Hal tersebut dikarenakan semakin tinggi suhu maka kinetika reaksi kimia dan koefisien difusi CO₂ juga meningkat yang menyebabkan konsentrasi CO₂ terlarut yang berkesetimbangan dalam pelarut akan berpindah ke sisi yang konsentrasinya rendah dan mengakibatkan gaya pendorong (*driving force*) terjadinya perpindahan massa CO₂ bertambah besar. Koefisien difusi dan *enhancement factor* yang meningkat juga dapat menyebabkan penurunan viskositas larutan, hal ini meningkatkan laju perpindahan massa CO₂.

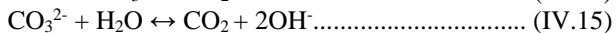
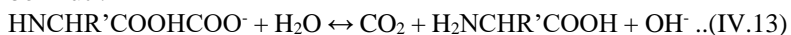


Gambar IV.7 Pengaruh suhu pelarut terhadap efisiensi desorpsi pada berbagai jenis pelarut umpan ($Q_{\text{pelarut}} = 100$ ml/menit ; $P_{\text{vakum}} = 20$ kPa)

Gambar IV.7 menunjukkan pengaruh perubahan suhu terhadap efisiensi desorpsi pada berbagai jenis pelarut. Hasil percobaan menunjukkan bahwa menggunakan pelarut DEA-Arginin menghasilkan efisiensi desorpsi lebih tinggi dibandingkan DEA-PZ. Hal ini terjadi dikarenakan beberapa pengaruh sesuai dengan penjelasan pada Subbab IV.2.1 dimana pH pelarut yang lebih rendah akan lebih mudah dalam meningkatkan tekanan parsial CO_2 sehingga CO_2 akan mudah terlepas dari pelarut dan berubah fasa menjadi gas. Selain itu terdapat pengaruh jumlah grup amin (NH_2) dalam struktur molekul aktivator terhadap kinerja efisiensi desorpsi CO_2 yang dibuktikan oleh peneliti sebelumnya (Wang, dkk. 2012) yang melakukan percobaan desorpsi CO_2 dengan menggunakan kontaktor membran teknologi regenerasi vakum dan membandingkan beberapa jenis pelarut, dimana dalam penelitiannya disimpulkan bahwa pelarut yang memiliki jumlah grup amin (NH_2) yang paling banyak akan menghasilkan efisiensi desorpsi CO_2 yang paling tinggi. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan grup amin yang banyak akan membuat pelarut lebih

reaktif, memudahkan karbamat dan ion bikarbonat untuk terkonversi menjadi CO₂ serta ketidakstabilan ion karbamat dan bikarbonat dalam reaksi menyebabkan konstanta reaksi desorpsi semakin tinggi dan tekanan parsial ekuilibrium CO₂ lebih tinggi daripada pelarutnya mendorong terjadinya pelepasan CO₂ dalam pelarut. Hasil penelitian dari Wang, dkk. (2012) sesuai dengan hasil percobaan yang didapatkan dimana pelarut DEA-Arginin yang memiliki jumlah grup amin lebih banyak (NH₂ dalam arginine = 2) dibandingkan dengan DEA-PZ (NH₂ dalam PZ = 0) menghasilkan efisiensi desorpsi tertinggi yaitu sebesar 77,48 % pada suhu pelarut 70 °C.

Dalam proses desorpsi mekanisme reaksi yang dapat terjadi selama regenerasi pelarut dan pelepasan CO₂ adalah sebagai berikut :

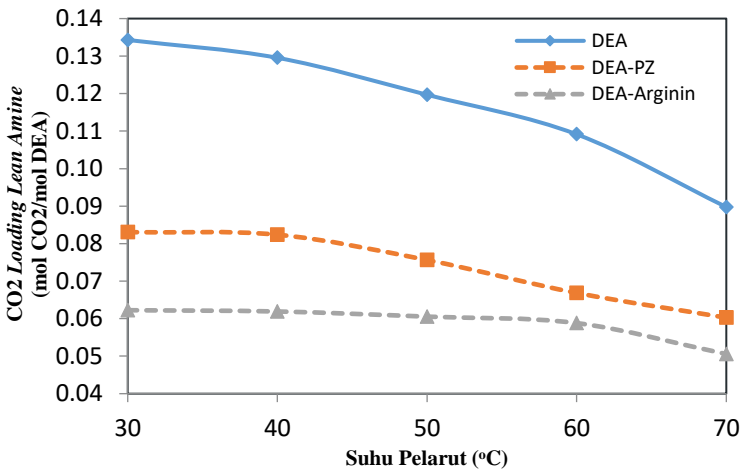


Dalam reaksi (IV.13) terlihat bahwa karbamat terhidrolisa menjadi amin dan CO₂. Kestabilan karbamat dalam reaksi tersebut menentukan entalpi penguraian karbamat untuk pelepasan CO₂ (Zhang, dkk, 2007). Arginin dan PZ masing-masing memiliki struktur molekul khusus sebagai aktivator yang sangat reaktif sebagai hasilnya memudahkan penguraian karbamat menjadi CO₂ dibandingkan dengan pelarut DEA tanpa aktivator.

IV.2.3 Pengaruh Suhu Pelarut terhadap CO₂ loading

Pengaruh suhu pelarut terhadap CO₂ loading ditunjukkan oleh **Gambar IV.8**. Hasil menunjukkan untuk masing-masing jenis pelarut dengan nilai CO₂ loading umpan *rich amine* yang sama untuk ketiga jenis pelarut yaitu sebesar 0,22 mol CO₂/mol DEA, grafik tersebut menunjukkan semakin tinggi suhu pelarut maka nilai CO₂ loading dalam pelarut keluar kontaktor membran desorpsi (disebut sebagai *lean amine*) cenderung turun. Dengan kata lain semakin tinggi suhu pelarut (*rich amine*) yang masuk kontaktor membran desorpsi maka semakin banyak jumlah CO₂ yang terlepas dari pelarut dan menyebabkan jumlah CO₂ yang

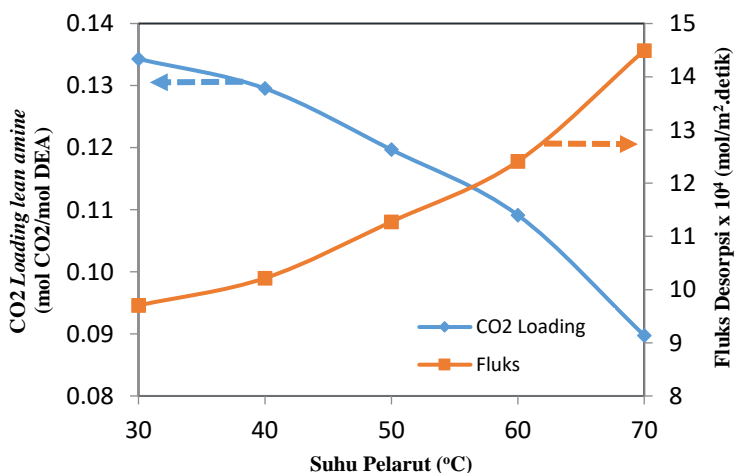
terkandung dalam pelarut *lean amine* semakin berkurang. **Gambar IV.8** menunjukkan lebih rinci bahwa nilai CO_2 loading *lean amine* untuk pelarut DEA-Arginin lebih tinggi dibandingkan pelarut lainnya. Hal ini berkaitan dengan penjelasan pada subbab **IV.2.1** dan **IV.2.2** bahwa laju perpindahan massa CO_2 (fluks) dan efisiensi desorpsi untuk pelarut DEA-Arginin lebih tinggi dibandingkan dengan pelarut lainnya yang menyebabkan jumlah CO_2 dalam *lean amine* pelarut DEA-Arginin lebih sedikit dibandingkan pelarut lainnya.



Gambar IV.8 Pengaruh suhu pelarut terhadap CO_2 loading *lean amine* pada berbagai jenis pelarut umpan $Q_{\text{pelarut}} = 100$ ml/menit ; $P_{\text{vakum}} = 20$ kPa)

Pada subbab **IV.2.1** dan **IV.2.2** telah dijelaskan bahwa meningkatnya suhu pelarut menyebabkan nilai fluks desorpsi semakin meningkat. Fluks desorpsi CO_2 yang meningkat menyebabkan laju perpindahan massa CO_2 semakin cepat berdifusi melalui pori membran ke sisi fasa gas dan menyebabkan jumlah CO_2 yang berhasil terlepas dari pelarut serta terikut dalam aliran vakum semakin besar. Fluks desorpsi CO_2 yang meningkat seiring dengan kenaikan suhu berbanding terbalik dengan nilai CO_2 loading *lean amine* sesuai dengan yang ditunjukkan pada **Gambar**

IV.9. Hasil percobaan yang sama juga didapatkan oleh peneliti sebelumnya Ismail, dkk. (2013) yang melakukan penelitian desorpsi CO₂ dengan melihat pengaruh variasi laju alir dan suhu pelarut terhadap fluks desorpsi (*stripping*) dan konsentrasi CO₂ di pelarut keluar membran desorpsi. Pada percobaan tersebut disimpulkan bahwa semakin tinggi laju alir dan suhu pelarut maka semakin tinggi laju perpindahan massa CO₂ dari fasa cairan ke fasa gas dan konsentrasi CO₂ dalam pelarut yang keluar membran semakin sedikit. Selain itu dengan perubahan suhu pelarut dapat mempengaruhi tekanan parsial ekuilibrium CO₂, konstanta ekuilibrium reaksi kimia dan koefisien difusi dimana setiap kenaikan suhu pelarut 10 °C akan meningkatkan sebanyak 5-8 kali tekanan parsial ekuilibrium CO₂.



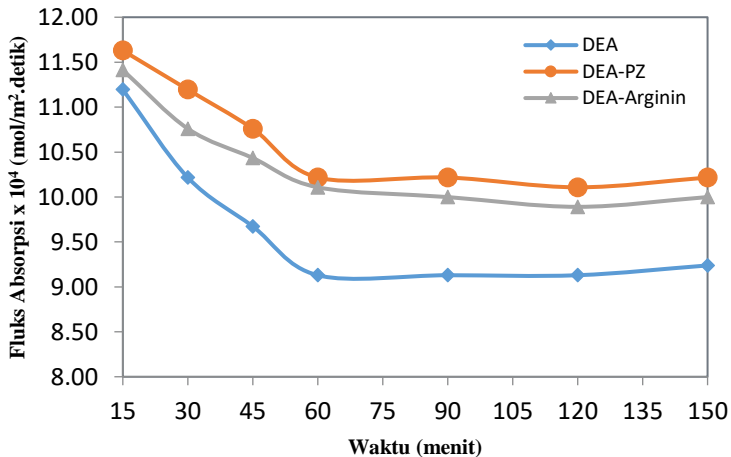
Gambar IV.9 Pengaruh suhu pelarut terhadap CO₂ loading lean amine dan fluks desorpsi untuk pelarut DEA tunggal ($Q_{\text{pelarut}} = 100$ ml/menit ; $P_{\text{vakum}} = 20$ kPa)

Dari hasil penelitian dapat diketahui bahwa nilai CO₂ loading lean amine maksimal yang dapat terdesorpsi oleh pelarut DEA tunggal adalah hingga 0,09 mol CO₂/mol DEA pada suhu 70 °C, nilai tersebut masih sesuai dalam rentang dengan yang

disebutkan oleh Sulaiman, dkk. (1998) bahwa nilai maksimal CO_2 loading untuk pelarut DEA adalah 0-0,5 mol CO_2 /mol DEA.

IV.3 Uji Kinerja Modul Kontaktor Membran

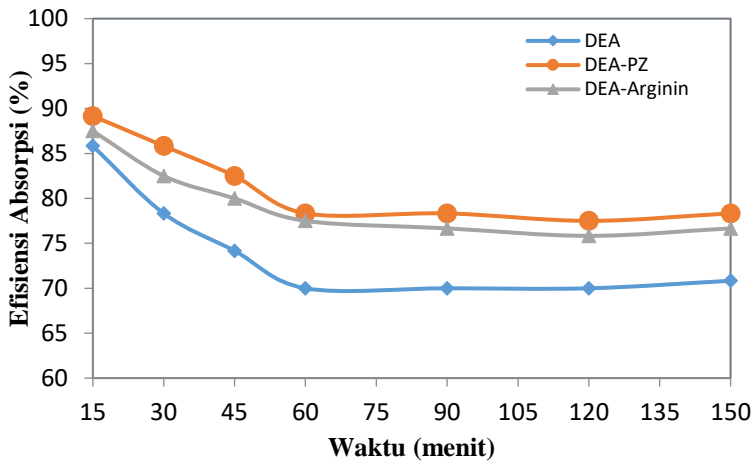
Uji kinerja pada modul kontaktor membran dilakukan untuk mengetahui ketahanan modul membran yang dapat dilihat dari nilai fluks dan efisiensi pemisahan CO_2 . Uji kinerja dilakukan secara kontinyu selama 150 menit operasi dengan menggunakan parameter operasi terbaik yang didapatkan dari percobaan awal. Parameter operasi untuk uji kinerja kontaktor membran berdasarkan nilai efisiensi pemisahan CO_2 tertinggi pada proses absorpsi yaitu sebesar 97,55% dengan sistem pelarut DEA-PZ. Pada penelitian digunakan parameter operasi terbaik dengan laju alir gas umpan 200 ml/menit dan laju alir pelarut 100 ml/menit. Sedangkan suhu pemanasan pelarut dipilih suhu tertinggi yaitu 70°C pada proses desorpsi. Dalam operasi uji kinerja modul membran, pelarut disirkulasi dalam modul kontaktor membran absorpsi maupun desorpsi selama 150 menit.



Gambar IV.10 Pengaruh waktu operasi terhadap uji kinerja fluks absorpsi untuk variabel operasi terbaik ($Q_g = 200$ ml/menit ; $Q_l = 100$ ml/menit $T = 70^\circ\text{C}$; $P_{\text{vakum}} = 20$ kPa)

Gambar IV.10 menunjukkan fluks absorpsi pada 15 menit pertama mengalami penurunan dan pada 60 menit hingga seterusnya menunjukkan hasil yang cenderung konstan. Lv, dkk. (2012) juga melakukan penelitian uji kinerja kontaktor membran polipropilena dengan pelarut MEA selama dua minggu (14 hari) dan hasil yang didapatkan adalah fluks absorpsi masih stabil pada tiga hari pertama kemudian mulai menurun pada hari ke-4 hingga hari ke-14. Lv, dkk (2012) menjelaskan bahwa penurunan nilai fluks absorpsi setelah tiga hari operasi disebabkan oleh meningkatnya hambatan perpindahan massa di bagian membran yang disebabkan karena sebagian pori membran terisi oleh pelarut.

Hambatan perpindahan massa membran pada kontaktor membran meningkat karena adanya cairan mengisi pori membran sehingga terjadi pembasahan yang menyebabkan menurunnya difusivitas gas ketika melewati pori membran. Wang, dkk. (2004) melakukan penelitian tentang pengaruh pelarut DEA pada permukaan membran polipropilena dan menemukan hasil bahwa ketika terjadi kontak antara DEA dan membran polipropilena dalam waktu lama memberikan pengaruh yang signifikan pada struktur pori – pori permukaan membran. Ukuran pori – pori membran yang menjadi lebih besar dikaitkan pada penyerapan yang terjadi pada bagian meniskus cairan ke dalam pori membran yang kemudian menyebabkan pembasahan dan perubahan morfologi pori. DEA yang telah mengandung CO₂ juga memiliki kecenderungan untuk menyebar pada permukaan material dibandingkan dengan larutan DEA tunggal.



Gambar IV.11 Pengaruh uji kinerja terhadap efisiensi pemisahan CO_2 untuk variabel optimal ($Q_g = 200$ ml/menit ; $Q_l = 100$ ml/menit $T = 70^\circ\text{C}$; $P_{\text{vakum}} = 20$ kPa)

Gambar IV.11 menunjukkan kecenderungan yang sama antara efisiensi pemisahan CO_2 dengan fluks absorpsi yang ditunjukkan pada **Gambar IV.10**. Pada 60 menit pertama, efisiensi pemisahan CO_2 mengalami penurunan dan selanjutnya cenderung konstan. Menurunnya efisiensi pemisahan CO_2 pada 60 menit pertama kemungkinan disebabkan karena terjadinya fenomena pembasahan, dimana pori membran terisi oleh cairan sehingga hambatan membran menjadi lebih besar dan gas CO_2 dalam aliran gas umpan tidak lagi terserap secara maksimal oleh pelarut dan juga sebaliknya untuk proses pelepasan CO_2 dari pelarut ke dalam sisi aliran gas dengan vakum. Hasil ini sesuai dengan penelitian Kosaraju (2005) yang menjelaskan pengaruh fenomena pembasahan terhadap bertambahnya hambatan yang dikarenakan oleh pori membran terisi oleh pelarut. Pelarut yang masuk ke dalam pori membran berperan sebagai pembawa gas CO_2 dan menambah hambatan pada membran sehingga absorpsi CO_2 tidak mengalami kenaikan efisiensi pemisahan seiring waktu. Setelah terjadinya fenomena pembasahan, performa kontaktor membran telah

mencapai titik minimal sehingga respon efisiensi pemisahan CO₂ cenderung stabil.

Selain karena adanya pengaruh pembasahan pada pori membran, menurunnya efisiensi pemisahan CO₂ setelah 15 menit pertama juga disebabkan oleh pelarut DEA yang disirkulasi telah jenuh. Pada 60 menit pertama efisiensi pemisahan gas CO₂ masih tinggi dan cenderung menurun dikarenakan pelarut yang masuk berupa pelarut dengan kondisi baru atau belum jenuh. Setelah melewati satu jam pertama, efisiensi pemisahan CO₂ menurun secara drastis dan mencapai kondisi konstan sehingga dapat dikatakan bahwa pelarut yang disirkulasi telah jenuh dan sudah tidak dapat lagi menyerap CO₂ secara efektif.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Pelarut yang terbaik dalam proses absorpsi maupun desorpsi CO₂ adalah pelarut DEA teraktivasi. Dimana untuk proses absorpsi CO₂ pelarut yang terbaik adalah pelarut DEA-PZ dengan perbandingan efisiensi pemisahan 1,3 kali lebih tinggi dibandingkan pelarut DEA tidak teraktivasi. Sedangkan untuk proses desorpsi CO₂ pelarut yang terbaik adalah DEA-Arginin dengan perbandingan efisiensi pemisahan 1,9 kali lebih tinggi dibandingkan dengan pelarut tidak teraktivasi.
2. Pengaruh parameter operasi laju alir gas umpan terhadap fluks absorpsi dan efisiensi pemisahan absorpsi CO₂
 - Fluks absorpsi tertinggi diperoleh sebesar $36,19 \times 10^{-4}$ mol/m².detik dengan pelarut DEA-PZ serta kondisi operasi $Q_g = 600$ ml/menit dan $Q_L = 100$ ml/menit
 - Efisiensi pemisahan absorpsi CO₂ tertinggi sebesar 97,55% dengan pelarut DEA-PZ serta kondisi operasi $Q_g = 200$ ml/menit dan $Q_L = 100$ ml/menit.
3. Pengaruh parameter operasi suhu pelarut terhadap fluks desorpsi dan efisiensi pemisahan desorpsi CO₂
 - Fluks desorpsi tertinggi diperoleh sebesar $18,5 \times 10^{-4}$ mol/m².detik dengan pelarut DEA-Arginin serta kondisi operasi $T_{rich} = 70$ °C, $Q_L = 100$ ml/menit dan $P_{vakum} = 20$ kPa.
 - Efisiensi pemisahan desorpsi CO₂ tertinggi sebesar 77,48% dengan pelarut DEA-Arginin serta kondisi operasi $T_{rich} = 70$ °C, $Q_L = 100$ ml/menit dan $P_{vakum} = 20$ kPa.

4. Uji kinerja kontaktor membran:
Dipilih jenis pelarut dan kondisi operasi terbaik yaitu pelarut DEA-PZ dan kondisi operasi $Q_g = 200$ ml/menit, $Q_L = 100$ ml/menit, $T_{rich} = 70$ °C dan $P_{vakum} = 20$ kPa.
- Selama 60 menit pertama, fluks absorpsi turun drastis hingga $10,22 \times 10^{-4}$ mol/m².s. Lebih dari 60 menit, performa kontaktor membrane telah mencapai titik minimal sehingga respon efisiensi pemisahan CO₂ cenderung stabil.
 - Selama 60 menit pertama, efisiensi pemisahan absorpsi CO₂ turun drastis hingga 78,33%. Lebih dari 60 menit, efisiensi pemisahan absorpsi CO₂ sudah berjalan dengan stabil.
 - Secara keseluruhan, kontaktor membran mampu menjalankan fungsi absorpsi dan desorpsi selama 60 menit uji kinerja.

V.2. Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan diperoleh saran untuk penelitian selanjutnya diantaranya yaitu :

1. Hasil penelitian untuk proses desorpsi belum mencapai kondisi optimal. Ada baiknya untuk penelitian selanjutnya selain dengan regenerasi vakum juga digunakan bantuan *sweeping gas* untuk menambah gaya pendorong (*driving force*) perpindahan massa CO₂. Selain itu ada baiknya jika pengaruh besarnya energi desorpsi diperhitungkan agar mengetahui batasan besarnya temperatur yang menghasilkan fluks dan efisiensi desorpsi terbaik namun energi yang dibutuhkan juga minimal baik energi pemanas maupun daya pompa vakum.
2. Adanya perbedaan nilai fluks dan efisiensi pemisahan antara proses absorpsi dan desorpsi CO₂ juga dipengaruhi oleh luas kontak *gas-liquid* dimana nilai fluks dan efisiensi pemisahan desorpsi CO₂ lebih rendah dibandingkan nilai fluks dan efisiensi pemisahan absorpsi CO₂ sehingga untuk

penelitian selanjutnya jumlah membrane desorpsi bias ditambahkan menjadi 1,25 kali lebih banyak dari jumlah membrane absorpsi berdasarkan perhitungan luas kontak kontaktor membran absorpsi dan desorpsi yang digunakan.

3. Perlu dilakukan analisa konsentrasi CO₂ di dalam pelarut dan *sales gas* berdasarkan prosedur analisa yang standar untuk memastikan analisa titrasi *chittick* yang dilakukan mendapatkan hasil analisa yang akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Bishnoi, Sanjai. 2000. *Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Piperazine: Reaction Kinetics, Mass Transfer and Solubility*. Chemical Engineering Science, 55, 5531-5543.
- Cerato A.B. 2015. *Determination of Soil Carbonate Content*. Unervercity of Oklahoma.
- Chen, Guangwen. 2016. *Desorption of Carbon Dioxide from Aqueous MDEA Solution in a Microchannel Reaction*. The Chemical Engineering Journal, 307, 776-184.
- Closmann, Fred. 2009. *MDEA/Piperazine as a Solvent for CO₂ Capture*. Energy Procedia, 1, 1351-1357.
- 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. dan Vesrteeg, G.F. 2005. *Gas-liquid Mass Transfer in a Cross-Flow Hollow Fiber Module : Analytical Model and Experimental Validation*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 48, 3353-3362.
- Dindore, V.Y. 2004. *Membrane-solvent Selection for CO₂ Removal Using Membrane Gas-liquid Contactors*, Separation and Purification Technology, 40, 133-145.
- Eriek Antonius, A.N. 2012. *Absorpsi CO₂ Memalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Larutan Penyerap Campuran Senyawa Amina (MEA/DEA) : Variasi Komposisi Amina*. Jurusan Teknik Kimia. Universitas Indonesia.

- Fang, M. 2009. *CO₂ Chemical Absorption by Using Membrane Vacuum Regeneration Technology*, Energy Procedia, 1, 815-822.
- Fang Mengxiang. 2012. *CO₂ Desorption from Rich Alkanolamine Solution by using Membrane Vacuum Regeneration Technology*. International Journal of Greenhouse gas Control, 9, 507-521
- Feron, P.H.M. dan Jansen, A.E. 1995. *Capture of Carbondioxide Using Membrane Gas Absorbtion and Reuse in The Horticultural Industry*. Department of Chemical Engineering. Energy Convers.Vol.36, No.6-9,pp. 411-414.
- Feron, P.H.M dan Jansen, A.E. 2002. *CO₂ Separation with Polyolefin Membrane Contactors and Dedicated Absorption Liquids : Performances and Prospects*. Separation and Purification Technology, 27, 231-242.
- Gabelman, A. dan Hwang, S.T. 1999. *Hollow Fiber Membrane Contactors*.Journal of Membrane Science, 159, 61-106.
- Hedayat. 2011. *Simultaneous Separation of H₂S and CO₂ from Natural Gas by Hollow Fiber Membrane Contactor Using Mixture of Alkanolamines*. Journal of Membrane Science, 377, 191-197.
- Hook, Robert J. 1997. *An Investigation of Some Sterically Hindered Amines as Potential Carbone Dioxide Scrubbing Compounds*. American Chemical Society, 36,1779-1790.
- Intan, N. dan Widyawati. 2016. *Penggunaan Kontaktor Membran Menyilang Ganda untuk Pemisahan Gas CO₂ dengan Aliran Pelarut Dietanolamina (DEA) Secara Kontinyu*. Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, ITS Surabaya.

- Kartohardjono. 2007. *Absorpsi CO₂ dari campurannya dengan CH₄ dan N₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Pelarut Air*. Departemen Teknik Kimia. Universitas Indonesia: Jakarta.
- Karoor, S. dan Sirkar, K.K. 1993. *Gas Absorption Studies in Microporous Hollow Fiber Membrane Modules*. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 32, 674-681.
- Khaisri. 2010. *A Mathematical Model for Gas Absorption Membrane Contactors that Studies the Effect of Partially Wetted Membranes*. *Journal of Membrane Science*, 347, 228-239
- Khaisri. 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, Young-Seok, dan Yang, Seung-Man,. 2000. *Absorption of Carbon Dioxide Through Hollow Fiber Membranes Using Various Aqueous Absorbents*, *Separation and Purification Technology*, 21, 101-109
- Kohl, Arthur & Richard Nielsen. 1997. *Gas Purification*. Texas: Gulf Publishing.
- Kosaraju, P and Kovvali, A.S. 2005. *Hollow Fiber Membrane Contactor Based CO₂ Absorption-Stripping Using Novel Solvents and Membrane*. *Ind. Eng. Chem. Res*, 44, 1250-1258
- Kreulen, H. 1993. *Determination of Mass Transfer Rates in Wetted and Non Wetted Microporous Membranes*. *Chemical Engineering Science*, 48, 2093-2102.

- Kumar, P.S. 2002. *New Absorption Liquids for The Removal of CO₂ from Dilute Gas Streams Using Membrane Contactors*. 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*. Chemical Engineering Science, 55, 5531-5543.
- Li, T. dan Keener, T.C. 2016. A review : *Desorption of CO₂ from Rich Solutions in Chemical Absorption Process*. Chemical and Environmet Engineering, 291-302.
- Li, Jing-Liang dan Chen, Bing-Hung. 2005. *Review of CO₂ Absorption Using Chemical Solvents in Hollow Fiber Membrane Contactors*, Separation and Purification Technology, 41, 109-122.
- Lu Gang-Jing. 2006. *Effect of Activators on Mass-Transfer Enhancement in a Hollow Fiber Contactor using Activated Alkanolamine Solutions*. Nanjing University. China.
- Lv, Yuexia. 2012. *Experimental Studies on Simultaneous Removal of CO₂ and SO₂ in A Polypropylene Hollow Fiber Membrane Contactor*. Article in Press Journal of Applied Energy
- Mansourizadeh, A. dan Ismail, A.F. 2009. *Hollow Fiber Gas-Liquid Membrane Contactors for Acid Gas Capture: Review*. Journal of Hazardous Materials, 171, 38-53.
- Mulder, M.1996. *Basic Principles of Membrane Technology*. 2nd Ed. Kluwer Academic: Dordrecht.
- Munoz, Ducle M. 2009. *New Liquid Absobents for the Removal of CO₂ from Gas Mixtures*. Energy & Environmental Science, 2, 883-891.

- Nihmiya, A.R., Ghasem, N., Al-Marzouqi, M. 2015. *Absorption of CO₂ from Natural Gas Using Different Amino Acid salt Solutions and Regeneration Using Hollow Fiber Membran Contactors*. UAE University, 108-117.
- 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.
- Perry, R.H., dan Green, D. W. 2008 *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. Amerika.
- Putra, I.Ardiyanto. 2012. *Kontaktor Membran Cair-Gas untuk Pemisahan CO₂*. Jurusan Teknik Kimia : ITB Bandung.
- Prasetya, Angga Alief. 2014. *Desorpsi CO₂ pada Membran Kontaktor Menggunakan Proses Regenerasi Vakum*. Institut Teknologi Bandung- Bandung.
- Qi, Zhang dan Cussler, E.L. 1985. *Microporus Hollow Fibers for Gas Absorption*. Journal of Membrane Science, 23, 333-345
- Rahim, Nihmiya Abdul. 2015. *Absorption of CO₂ from Natural Gas Using Different Amino Acid Salt Solutions and Regeneration Using Hollow Fiber Membrane Contactors*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 26, 108-117.
- Rahbari-Sisakht. M. 2012. *Carbon Dioxide Stripping from Diethanolamine Solution through Porous Surface Modified PVDF Hollow Fiber Membrane Contactor*. Journal of Membrane Science, 427, 270-275.
- Rahmawati, Yeni.; Setiani; dan Syafira. 2014. *Pengaruh Modifikasi Permukaan Membran Polipropilen untuk Proses Pemisahan CO₂*. Jurusan Teknik Kimia: Surabaya.

- 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. dan 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.
- Yan, S.P. 2014. *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.
- Yan Shuiping. 2012. *Regeneration Performance of CO₂-Rich Solvents by Using Membrane Vacuum Regeneration Technology : Relationships Between Absorbent Structure and Regeneration Efficiency*. Applied Energy, 98, 357-367.
- Yu, Cheng-Hsiu. 2012. A review of CO₂ Capture by Absorption and Desorption. Aerosol and Air Quality Research, 12, 745-769.
- Wang, K.L. dan Cussler, E.L. 1993. *Baffled Membrane Modules Made with Hollow Fiber Fabric*. Journal of Membrane Science, 85, 265-278.
- Wang, R. 2003. *Impact of DEA Solutions With and Without CO₂ Loading on Porous Polypropylene Membranes Intended for Use as Contactors*. Journal of Membrane Science, 229, 147-157
- Wang, S., Hawboldt, K., dan Abdi, M.A. 2006. *Novel Dual-Membrane Gas-Liquid Contactors: Modelling and*

Concept Analysis. Industrial and Engineering Chemistry Research, 45, 7882-7891.

Wang Zhen. 2014. *Membrane Stripping Technology for CO₂ Desorption from CO₂-Rich Absorbent with Low Energy Consumption*. Energi Procedia, 63, 765-772.

Wang Zhen. 2013. *Amine-based Absorbent Selection for CO₂ Membrane Vacuum Regeneration Tecnology by Combined Absorption-Desorption Analysis*. Chemical Engineering Science, 93, 238-249.

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

DAFTAR NOTASI

BM	Berat molekul	(gr/mol)
C	Konsentrasi gas	(mol/L)
d_i	Diameter dalam membran	(mm)
d_o	Diameter luar membran	(mm)
d_p	Diameter pori membran	(mm)
J	Laju perpindahan massa	(mol/s.m ²)
N	Normalitas	(mol/L)
Q	Laju Alir gas	(ml/menit)
A	Luas kontak gas-cair	(m ²)
T_g	Temperatur gas	(K)
X	Fraksi mol	-
y	Persentase CO ₂ yang terambil	(%)
	Sudut kontak	(°)

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

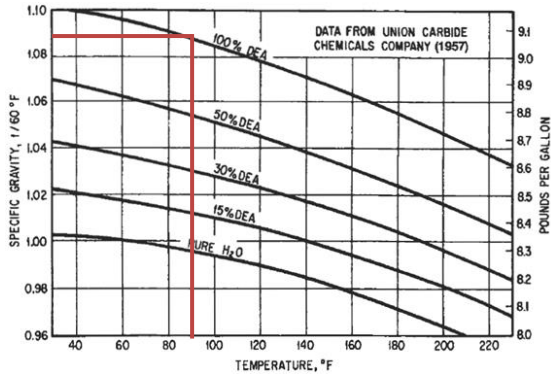
APPENDIKS

I. Perhitungan Kebutuhan Pelarut

I. 1 Pembuatan Larutan DEA 30% berat

I.1.1 Menghitung Densitas Larutan

$Suhu\ air = 30^{\circ}C = 86^{\circ}F$



(Sumber: Kohl & Nielsen, 1997)

Gambar I.1 Grafik *Specific Gravity* Pelarut DEA

$$\begin{aligned}
 s.g._{DEA} &= 1,088 \text{ (dari grafik 100\% DEA)} \\
 \rho_{air} &= 0,995 \text{ g/cm}^3 \text{ (Geankoplis, 2003)} \\
 &= 0,995 \text{ kg/L}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_{DEA} &= s.g._{DEA} \times \rho_{air} \\
 &= 1,088 \times 0,995 \\
 &= 1,083 \text{ gr/cm}^3 \\
 &= 1,083 \text{ kg/L}
 \end{aligned}$$

Misal 1000 gr Larutan DEA 30% berat :

$$\begin{aligned}
 m_{DEA} &= 1000 \times 0.3 \\
 &= 300 \text{ gr} = 0,3 \text{ kg} \\
 m_{air} &= 1000 \times 0.7 \\
 &= 700 \text{ gr} = 0,7 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Dapat dihitung volume masing-masing :

$$V_{DEA} = \frac{m_{DEA}}{\rho_{DEA}}$$
$$= \frac{0,3 \text{ kg}}{1,083 \text{ kg/L}}$$
$$V_{DEA} = 0,2770 \text{ L}$$

$$V_{air} = \frac{m_{air}}{\rho_{air}}$$
$$= \frac{0,7 \text{ kg}}{0,995 \text{ kg/L}}$$
$$V_{air} = 0,7035 \text{ L}$$

Maka densitas Larutan DEA 30% berat :

$$\rho_{larutan} = \frac{m_{DEA} + m_{air}}{V_{DEA} + V_{air}}$$
$$= \frac{0,3 + 0,7}{0,2770 + 0,7035}$$
$$\rho_{larutan} = 1,0199 \text{ kg/L} = 1,0199 \text{ gr/cm}^3$$

I.1.2 Menghitung Kebutuhan Massa DEA dan Air

Ditentukan :

Laju alir liquid masuk kontaktor membran = 100 mL/menit

Waktu operasi = 15 menit

Maka, volume larutan yang dibutuhkan :

$$V_{larutan} = 100 \text{ mL/menit} \times 15 \text{ menit}$$
$$= 1500 \text{ mL}$$

Dikarenakan terdapat 5 variasi laju alir gas masuk, maka

$$V_{larutan} = 1500 \text{ mL} \times 5$$
$$= 7500 \text{ mL}$$
$$= 7,5 \text{ L}$$

$$m_{larutan} = V_{larutan} \times \rho_{larutan}$$
$$= 7,5 \text{ L} \times 1,0199 \text{ kg/L}$$
$$= 7,6490 \text{ kg}$$
$$= 7649 \text{ gr}$$

Maka massa masing-masing yang harus ditimbang :

- Dikarenakan DEA yang tersedia adalah 98% berat sehingga

$$\begin{aligned}m_{DEA} &= \frac{30\% \times m_{larutan}}{\text{kemurnian}} \\ &= \frac{0,3 \times 7649}{0,98} \\ &= 2341,517 \text{ gr}\end{aligned}$$

- $m_{air} = 70\% \times m_{larutan}$
 $= 0,7 \times 7649$
 $= 5354,270 \text{ gr} = 5,3543 \text{ kg}$

atau

$$\begin{aligned}V_{air} &= \frac{m_{air}}{\rho_{air}} \\ &= \frac{5,354 \text{ kg}}{0,995 \text{ kg/L}} \\ V_{air} &= 5,3812 \text{ L}\end{aligned}$$

Konsentrasi Larutan DEA 30% berat adalah :

$$\text{Molaritas} = \frac{m_{DEA}/BM_{DEA}}{V_{larutan}}$$

Diketahui : $BM_{DEA} = 105,14 \text{ gr/mol}$

$$\begin{aligned}\text{Molaritas} &= \frac{2341,517 \text{ gr}/105,14 \text{ gr/mol}}{7,5 \text{ L}} \\ &= 2,969 \text{ M}\end{aligned}$$

I.2 Pembuatan Larutan DEA 29% + PZ 1% berat

I.2.1 Menghitung Densitas Larutan

Misal 1000 gr Larutan DEA 29% berat :

$$\begin{aligned}m_{DEA} &= 1000 \times 0,29 \\ &= 290 \text{ gr} = 0,29 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}m_{PZ} &= 1000 \times 0,01 \\ &= 10 \text{ gr} = 0,01 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}m_{air} &= 1000 \times 0,7 \\ &= 700 \text{ gr} = 0,7 \text{ kg}\end{aligned}$$

Dapat dihitung volume masing-masing :

$$\begin{aligned}V_{DEA} &= \frac{m_{DEA}}{\rho_{DEA}} \\ &= \frac{0,29 \text{ kg}}{1,083 \text{ kg/L}} \\ V_{DEA} &= 0,2678 \text{ L}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_{PZ} &= \frac{m_{PZ}}{\rho_{PZ}} \\ &= \frac{0,01 \text{ kg}}{1,1 \text{ kg/L}} \\ V_{PZ} &= 0,0091 \text{ L}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_{air} &= \frac{m_{air}}{\rho_{air}} \\ &= \frac{0,7 \text{ kg}}{0,995 \text{ kg/L}} \\ V_{air} &= 0,7035 \text{ L}\end{aligned}$$

Maka densitas Larutan DEA 29% berat :

$$\begin{aligned}\rho_{larutan} &= \frac{m_{DEA} + m_{PZ} + m_{air}}{V_{DEA} + V_{PZ} + V_{air}} \\ \rho_{larutan} &= \frac{0,29 + 0,01 + 0,7}{0,2678 + 0,0091 + 0,7035} \\ \rho_{larutan} &= 1,02 \text{ kg/L} = 1,02 \text{ gr/cm}^3\end{aligned}$$

I.2.2 Menghitung Kebutuhan Massa DEA dan Air

Ditentukan :

Laju alir liquid masuk kontaktor membran = 100 mL/menit

Waktu operasi = 15 menit

Maka, volume larutan yang dibutuhkan

$$\begin{aligned}V_{larutan} &= 100 \text{ mL/menit} \times 15 \text{ menit} \\ &= 1500 \text{ mL}\end{aligned}$$

Dikarenakan terdapat 5 variasi laju alir gas masuk, maka

$$\begin{aligned}V_{larutan} &= 1500 \text{ mL} \times 5 \\ &= 7500 \text{ mL} \\ &= 7,5 \text{ L}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_{\text{larutan}} &= V_{\text{larutan}} \times \rho_{\text{larutan}} \\
 &= 7,5 \text{ L} \times 1,02 \text{ kg/L} \\
 &= 7,6501 \text{ kg} \\
 &= 7650 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

Maka massa masing-masing yang harus ditimbang :

- Dikarenakan DEA yang tersedia adalah 98% berat sehingga

$$\begin{aligned}
 m_{\text{DEA}} &= \frac{29\% \times m_{\text{larutan}}}{\text{kemurnian}} \\
 &= \frac{0,3 \times 7650}{0,98} \\
 &= 2263,796 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

- Dikarenakan PZ yang tersedia adalah 99% berat sehingga

$$\begin{aligned}
 m_{\text{PZ}} &= \frac{1\% \times m_{\text{larutan}}}{\text{kemurnian}} \\
 &= \frac{0,01 \times 7650}{0,99} \\
 &= 77,273 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

- $m_{\text{air}} = 70\% \times m_{\text{larutan}}$
 $= 0,7 \times 7650$
 $= 5355,049 \text{ gr} = 5,355 \text{ kg}$

atau

$$\begin{aligned}
 V_{\text{air}} &= \frac{m_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}}} \\
 &= \frac{5,355 \text{ kg}}{0,995 \text{ kg/L}} \\
 V_{\text{air}} &= 5,382 \text{ L}
 \end{aligned}$$

Konsentrasi Larutan DEA 29% berat adalah :

$$\begin{aligned}
 \text{Molaritas} &= \frac{(m_{\text{DEA}}/BM_{\text{DEA}}) + (m_{\text{PZ}}/BM_{\text{PZ}})}{V_{\text{larutan}}} \\
 &= \frac{(2263,796/105,14) + (77,273/86,138) \text{ mol}}{7,5 \text{ L}} \\
 &= 2,99 \text{ M}
 \end{aligned}$$

I.3 Pembuatan Larutan DEA 29% + Arginine 1% berat

I.3.1 Menghitung Densitas Larutan

Misal 1000 gr Larutan DEA 29% berat :

$$\begin{aligned}m_{DEA} &= 1000 \times 0.29 \\ &= 290 \text{ gr} = 0,29 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}m_{Arginine} &= 1000 \times 0.01 \\ &= 10 \text{ gr} = 0,01 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}m_{air} &= 1000 \times 0.7 \\ &= 700 \text{ gr} = 0,7 \text{ kg}\end{aligned}$$

Dapat dihitung volume masing-masing :

$$\begin{aligned}V_{DEA} &= \frac{m_{DEA}}{\rho_{DEA}} \\ &= \frac{0,29 \text{ kg}}{1,083 \text{ kg/L}}\end{aligned}$$

$$V_{DEA} = 0,2678 \text{ L}$$

$$\begin{aligned}V_{Arginine} &= \frac{m_{Arginine}}{\rho_{Arginine}} \\ &= \frac{0,01 \text{ kg}}{1,3 \text{ kg/L}}\end{aligned}$$

$$V_{Arginine} = 0,0077 \text{ L}$$

$$\begin{aligned}V_{air} &= \frac{m_{air}}{\rho_{air}} \\ &= \frac{0,7 \text{ kg}}{0,995 \text{ kg/L}}\end{aligned}$$

$$V_{air} = 0,7035 \text{ L}$$

Maka densitas Larutan DEA 29% berat :

$$\rho_{larutan} = \frac{m_{DEA} + m_{Arginine} + m_{air}}{V_{DEA} + V_{Arginine} + V_{air}}$$
$$= \frac{0,29 + 0,01 + 0,7}{0,29 + 0,01 + 0,7}$$

$$\rho_{larutan} = \frac{1,0215}{0,29 + 0,01 + 0,7}$$

$$\rho_{larutan} = 1,0215 \text{ kg/L} = 1,0215 \text{ gr/cm}^3$$

I.3.2 Menghitung Kebutuhan Massa DEA dan Air

Ditentukan :

Laju alir liquid masuk kontaktor membran = 100 mL/menit

Waktu operasi = 15 menit

Maka, volume larutan yang dibutuhkan

$$\begin{aligned}V_{larutan} &= 100 \text{ mL/menit} \times 15 \text{ menit} \\ &= 1500 \text{ mL}\end{aligned}$$

Dikarenakan terdapat 5 variasi laju alir gas masuk, maka

$$\begin{aligned}V_{larutan} &= 1500 \text{ mL} \times 5 \\ &= 7500 \text{ mL} \\ &= 7,5 \text{ L}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}m_{larutan} &= V_{larutan} \times \rho_{larutan} \\ &= 7,5 \text{ L} \times 1,0215 \text{ kg/L} \\ &= 7,6610 \text{ kg} \\ &= 7661 \text{ gr}\end{aligned}$$

Maka massa masing-masing yang harus ditimbang :

- Dikarenakan DEA yang tersedia adalah 98% berat sehingga

$$\begin{aligned}m_{DEA} &= \frac{29\% \times m_{larutan}}{\text{kemurnian}} \\ &= \frac{0,29 \times 7661}{0,98} \\ &= 2267,03 \text{ gr}\end{aligned}$$

- Dikarenakan Arginine yang tersedia adalah 98% berat sehingga

$$\begin{aligned}m_{Arginine} &= \frac{1\% \times m_{larutan}}{\text{kemurnian}} \\ &= \frac{0,01 \times 7661}{0,98} \\ &= 78,173 \text{ gr}\end{aligned}$$

- $m_{air} = 70\% \times m_{larutan}$
 $= 0,7 \times 7661$
 $= 5362,699 \text{ gr} = 5,3627 \text{ kg}$

atau

$$\begin{aligned}V_{\text{air}} &= \frac{m_{\text{air}}}{\rho_{\text{air}}} \\ &= \frac{5,3627 \text{ kg}}{0,995 \text{ kg/L}} \\ V_{\text{air}} &= 5,3896 \text{ L}\end{aligned}$$

Konsentrasi Larutan DEA 29% berat adalah :

$$\begin{aligned}\text{Molaritas} &= \frac{(m_{\text{DEA}}/BM_{\text{DEA}}) + (m_{\text{Arginine}}/BM_{\text{Arginine}})}{V_{\text{larutan}}} \\ &= \frac{(2267,03/105,14) + (78,173/174,2) \text{ mol}}{7,5 \text{ L}} \\ &= \end{aligned}$$

II. Uji Pengaruh Parameter Operasi

II.1 Data Hasil Percobaan

II.1.1 Proses Absorpsi (konsentrasi CO₂ pada gas umpan 40% volume)

Variabel		Pengolahan Data							
No.	Pelarut	Laju Alir Feed Gas (ml/min)	CO ₂ dalam Feed Gas		CO ₂ dalam Sales Gas		Fluks Absorpsi (mol/m ² .s)	Efisiensi (%)	CO ₂ Loading (mol CO ₂ /mol DEA)
			m (gram)	Vol (mL)	m (gram)	Vol (mL)			
1	DEA	200	0,1584	80	0,0436	22,00	0,000946	72,50	0,1153
		300	0,2376	120	0,0660	33,33	0,001413	72,22	0,1241
		400	0,3168	160	0,0911	46,00	0,001859	71,25	0,1469
		500	0,3960	200	0,1241	62,67	0,002239	68,67	0,1673
		600	0,4752	240	0,1861	94,00	0,002380	60,83	0,1877
2	DEA-PZ	200	0,1584	80	0,0040	2,00	0,001272	97,50	0,1820
		300	0,2376	120	0,0119	6,00	0,001859	95,00	0,1941
		400	0,3168	160	0,0211	10,67	0,002435	93,33	0,2194
		500	0,3960	200	0,0290	14,67	0,003021	92,67	0,2515
		600	0,4752	240	0,0462	23,33	0,003532	90,28	0,2819

3	DEA-Arginin	200	0,1584	80	0,0066	3,33	0,001250	95,83	0,1651
		300	0,2376	120	0,0145	7,33	0,001837	93,89	0,1809
		400	0,3168	160	0,0238	12,00	0,002413	92,50	0,2009
		500	0,3960	200	0,0343	17,33	0,002978	91,33	0,2335
		600	0,4752	240	0,0620	31,33	0,003402	86,94	0,2607
4	DEA-K ₂ CO ₃	200	0,1584	80	0,0092	4,67	0,001228	94,17	0,1558
		300	0,2376	120	0,0145	7,33	0,001837	93,89	0,1678
		400	0,3168	160	0,0277	14,00	0,002380	91,25	0,1853
		500	0,3960	200	0,0422	21,33	0,002913	89,33	0,2210
		600	0,4752	240	0,0634	32,00	0,003391	86,67	0,2279
3	DEA-MSG	200	0,1584	80	0,0053	2,67	0,001261	96,67	0,1780
		300	0,2376	120	0,0119	6,00	0,001859	95,00	0,1848
		400	0,3168	160	0,0211	10,67	0,002435	93,33	0,2142
		500	0,3960	200	0,0290	14,67	0,003021	92,67	0,2428
		600	0,4752	240	0,0594	30,00	0,003424	87,50	0,2738

I.1.2 Proses Desorpsi

Variabel		Pengolahan Data								
No.	Pelarut	Suhu (°C)	CO ₂ dalam Rich Amine		CO ₂ dalam Lean Amine		Fluks Desorpsi (mol/m ² .s)	Efisiensi (%)	CO ₂ Loading (mol CO ₂ /mol MDEA) di Rich Amine	CO ₂ Loading (mol CO ₂ /mol MDEA) di Lean Amine
			m (gram)	Vol (mL)	m (gram)	Vol (mL)				
1	DEA	30	0,24829	125,397	0,17544	88,6076	0,00059977	29,3381	0,19006	0,1343
		40			0,16922	85,4671	0,00065097	31,8426		0,12954
		50			0,15634	78,9617	0,00075703	37,0304		0,11968
		60			0,14258	72,0077	0,0008704	42,576		0,10914
		70			0,11726	59,2213	0,00107886	52,7728		0,08976
2	DEA-PZ	30	0,29537	149,175	0,10926	55,1834	0,00153235	63,0075	0,22451	0,08305
		40			0,10837	54,7348	0,00153966	63,3083		0,08238
		50			0,09949	50,2483	0,0016128	66,3158		0,07562
		60			0,08794	44,4159	0,00170789	70,2256		0,06685
		70			0,07928	40,0416	0,0017792	73,1579		0,06026
3	DEA-	30	0,26028	131,453	0,08039	40,6025	0,00148115	69,1126	0,20155	0,06225

	Arginin	40			0,07995	40,3781	0,0014848	69,2833		0,06191
		50			0,07817	39,4808	0,00149943	69,9659		0,06053
		60			0,07595	38,3592	0,00151772	70,8191		0,05881
		70			0,06529	32,9755	0,00160549	74,9147		0,05056
4	DEA- K ₂ CO ₃	30	0,2474	124,948	0,10304	52,0429	0,00118857	58,3483	0,19118	0,07963
		40			0,09372	47,3321	0,00126537	62,1185		0,07242
		50			0,08306	41,9484	0,00135314	66,4273		0,06418
		60			0,07284	36,789	0,00143726	70,5566		0,05629
		70			0,0644	32,5268	0,00150675	73,9677		0,04977
5	DEA- MSG	30	0,2736	138,183	0,12614	63,7077	0,00121417	53,8961	0,21008	0,09685
		40			0,12037	60,7915	0,00144092	56,0065		0,09242
		50			0,1137	57,4267	0,00149577	58,4416		0,0873
		60			0,1066	53,8375	0,00155429	61,039		0,08185
		70			0,09683	48,9024	0,00163475	64,6104		0,07434

I.1.3 Uji Kinerja Kontaktor Membran Absorpsi-Desorpsi

Variabel			Pengolahan Data						
Pelarut	Q gas masuk (ml/min)	Waktu (t)	CO ₂ dalam Feed Gas		CO ₂ dalam Sales Gas		Fluks Absorpsi (mol/m ² .s)	Efisiensi (%)	CO ₂ Loading (mol CO ₂ /mol DEA)
			m (gram)	Vol (mL)	m (gram)	Vol (mL)			
DEA	200	15	0,1584	80	0,0172	8,67	0,001163	89,17	0,1404
		30	0,1584	80	0,0224	11,33	0,001119	85,83	0,1263
		45	0,1584	80	0,0277	14,00	0,001076	82,50	0,1178
		60	0,1584	80	0,0343	17,33	0,001022	78,33	0,1104
		90	0,1584	80	0,0343	17,33	0,001022	78,33	0,1084
		120	0,1584	80	0,0356	18,00	0,001011	77,50	0,1053
		150	0,1584	80	0,0343	17,33	0,001022	78,33	0,1023
DEA-PZ	200	15	0,1584	80	0,0224	11,33	0,001119	85,83	0,0922
		30	0,1584	80	0,0343	17,33	0,001022	78,33	0,0807
		45	0,1584	80	0,0409	20,67	0,000967	74,17	0,0699
		60	0,1584	80	0,0475	24,00	0,000913	70,00	0,0571
		90	0,1584	80	0,0475	24,00	0,000913	70,00	0,0581
		120	0,1584	80	0,0475	24,00	0,000913	70,00	0,0567

		150	0,1584	80	0,0462	23,33	0,000924	70,83	0,0574
DEA-Arginin	200	15	0,1584	80	0,0198	10,00	0,001141	87,50	0,1107
		30	0,1584	80	0,0277	14,00	0,001076	82,50	0,1057
		45	0,1584	80	0,0317	16,00	0,001043	80,00	0,0959
		60	0,1584	80	0,0356	18,00	0,001011	77,50	0,0864
		90	0,1584	80	0,0370	18,67	0,001000	76,67	0,0861
		120	0,1584	80	0,0383	19,33	0,000989	75,83	0,0864
		150	0,1584	80	0,0370	18,67	0,001000	76,67	0,0834

Dari hasil penelitian, akan didapatkan sampel gas dan sampel liquid. Sampel gas keluar dari modul kontaktor membran absorpsi disebut sebagai *sales gas*, sedangkan sampel gas keluar dari modul kontaktor membran desorpsi disebut sebagai gas CO₂ keluar. Dimana *flowrate* gas dapat dilihat dari *flowmeter*, % CO₂ didapat dari hasil analisa *Gas Chromatography*, dan CO₂ *loading* didapat dari hasil analisa titrasi chittick. Sedangkan untuk fluks dan efisiensi pemisahan CO₂ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang akan dijelaskan sebagai berikut :

Data yang diperlukan dalam perhitungan :

Unit	Nilai	Satuan
PBM CO ₂	44	gr/mol
BM N ₂	28	gr/mol
ρ CO ₂	1,980	gr/L
ρ N ₂	1,251	gr/L
ρ DEA	1,097	gr/L
P	1	atm
T	302,15	K
R	0,08205	L.atm/mol.K
Tg	302	K
D	0,35	mm
L	200	mm
N	3302	
E	0,65	
A	41278,71	mm ²

1. Contoh perhitungan fluks absorpsi dan desorpsi

Data hasil percobaan :

$$Q_{CO_2 in} = (Q_{in} \times C_{in}) = 80 \text{ ml/menit}$$
$$= 80 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{menit}$$

$$Q_{CO_2 out} = (Q_{out} \times C_{out}) = 22 \text{ ml/menit}$$
$$= 22 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{menit}$$

$$T_g = 30^\circ\text{C} = 302,15 \text{ K}$$

$$A = 0,05107 \text{ m}^2$$

Dimana :

Q_{in} dan Q_{out} : laju alir gas CO_2 masuk dan laju alir gas CO_2 keluar (m^3/s)

C_{in} dan C_{out} : konsentrasi *inlet* dan *outlet* dari gas CO_2 (mol/m^3)

C'_{in} dan C'_{out} : konsentrasi CO_2 *inlet* dan *outlet* dalam fase liquid (mol/m^3)

Q_l : laju alir pelarut (m^3/s).

T_g : suhu lingkungan ($^\circ\text{C}$)

A : luas kontak gas-liquid (m^2)

➤ Fluks Absorpsi

$$J_{CO_2} = \frac{(Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}) \times 273,15}{0,0224 \times T_g \times A}$$
$$= \frac{((80 \times 10^{-6}) - (22 \times 10^{-6})) \times 273,15}{0,0224 \times 302,15 \times 41278,71 \times 10^{-6} \times 60}$$
$$= 9,460 \times 10^{-4} \text{ mol} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$$

Jadi, fluks absorpsinya sebesar $9,460 \times 10^{-4} \text{ mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$.

➤ Fluks Desorpsi

$$\begin{aligned} J'_{CO_2} &= \frac{(C'_{in} - C'_{out}) \times 273,15 \times Q_l}{0,0224 \times T_g \times A} \\ &= \frac{(125,4 - 88,608) \times 10^{-6} \times 273,15}{0,0224 \times 302,15 \times 41278,71 \times 10^{-6} \times 60} \\ &= 5,998 \times 10^{-4} \text{ mol} / \text{m}^2 \cdot \text{s} \end{aligned}$$

Jadi, fluks desorpsinya sebesar $5,998 \times 10^{-4}$ mol/m².s.

2. Contoh perhitungan efisiensi absorpsi dan desorpsi

Data hasil percobaan :

$$\begin{aligned} Q_{CO_2 \text{ in}} &= (Q_{in} \times C_{in}) = 80 \text{ ml/menit} \\ &= 80 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{CO_2 \text{ out}} &= (Q_{out} \times C_{out}) = 22 \text{ ml/menit} \\ &= 22 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{menit} \end{aligned}$$

$$C'_{in} = 17\% = 0,1901$$

$$C'_{out} = 8\% = 0,1343$$

➤ Efisiensi Absorpsi

$$\eta = \frac{Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}}{Q_{in} \times C_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{80 \times 10^{-6} - 22 \times 10^{-6}}{80 \times 10^{-6}} \times 100\%$$

$$\eta = 72,50\%$$

➤ Efisiensi Desorpsi

$$\eta = \frac{C'_{in} - C'_{out}}{C'_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{0,1901 - 0,1343}{0,1343} \times 100\%$$

$$\eta = 29,338\%$$

3. Contoh perhitungan CO₂ loading dengan titrasi *chittick*

Data hasil percobaan titrasi :

$$\begin{aligned}V_{\text{gas}} &= 20,55 \text{ mL} \\V_{\text{HCl}} &= 3,6 \text{ mL} \\P &= 101,325 \text{ Pa} \\T &= 303,15 \text{ K} \\C_1 &= 2,969 \text{ mol/L} \\V_1 &= 2,5 \text{ mL}\end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned}V_{\text{gas}} &: \text{perubahan volume larutan NaCl yang} \\&\quad \text{pada } \textit{measuring burette} \text{ (mL)} \\V_{\text{HCl}} &: \text{volume HCl yang diperlukan (mL)} \\P &: \text{tekanan atmosfer (Pa)} \\T &: \text{suhu ruangan (K)} \\C_1 &: \text{konsentrasi pelarut (mol/L)} \\V_1 &: \text{volume sampel pelarut (mL)}.\end{aligned}$$

$$\alpha = \frac{\text{mol}(\text{CO}_2)}{\text{mol}(\text{pelarut})} = \left[\frac{(V_{\text{gas}} - V_{\text{HCl}})(P)(273\text{K})}{(101325 \text{ Pa})(T)(22,4 \text{ L/mol})} \right]$$

$$\alpha = \frac{(20,55 - 3,6) \times 101,325 \times 273}{101325 \times 303,15 \times 22,4} \\= \frac{2,969 \times 2,5}{2,969 \times 2,5}$$

$$\alpha = 0,1153 \frac{\text{mol}(\text{CO}_2)}{\text{mol}(\text{pelarut})}$$

LAMPIRAN A



Gambar A.1 Modul Kontaktor Membran



Gambar A.2 Instalasi Peralatan Percobaan Absorpsi-Desorpsi Kontaktor Membran



Gambar A.3 Analisa *Chittick*



Gambar A.4 Perubahan Warna Larutan Titrasi Dengan *Methyl Orange (MO)*

LAMPIRAN B

RIWAYAT HIDUP

Hafan Rofiq Syahnur



Hafan Rofiq Syahnur lahir di Padang, Sumatera Barat pada tanggal 30 Maret 1993. Menempuh pendidikan formal di SD Negeri 02 Padang tahun 1999-2005, kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMP Negeri 33 Padang tahun 2005-2008, kemudian melanjutkan pendidikan menengah atas di SMA Kartika I-5 Padang tahun 2008-2011 dan melanjutkan pendidikan Diploma III dengan jurusan Teknik

Kimia di Akademi Teknologi Industri Padang (ATIP) tahun 2011-2014. Setelah lulus dari pendidikan Diploma III, penulis melanjutkan ke tingkat sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Kimia pada tahun 2015 dan terdaftar dengan NRP 2315105025. Penulis mengambil tugas akhir bidang perpindahan panas dan massa dengan spesialisasi teknologi aplikasi membran gas-cair di bawah bimbingan Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. dan Fadilatul Taufany, S.T., Ph.D.. Selama masa kuliah penulis pernah mendapatkan kesempatan untuk kerja praktek di PT. PERTAMINA RU II Dumai, Riau pada tahun 2016.

Hormat saya,

Hafan Rofiq Syahnur
082381990090
hafanrofiq@gmail.com

Yusuf Zaelana



Yusuf Zaelana adalah nama penulis kedua untuk skripsi ini. Penulis dilahirkan di Sumedang, Jawa Barat pada tanggal 13 Januari 1993. Penulis menempuh pendidikan dimulai dari SD Negeri Boros, Sumedang tahun 1999-2004, melanjutkan ke SMP Negeri 2 Buahdua, Sumedang tahun 2004-2007 dan melanjutkan pendidikan ke sekolah vokasi SMK Negeri 7 Bandung dengan mengambil jurusan kimia industri pada tahun 2007-2010. Setelah lulus dari pendidikan menengah atas, penulis melanjutkan pendidikan diploma bidang teknik kimia di Politeknik Negeri Bandung tahun 2010-2013. Sempat bekerja di perusahaan petrokimia selama kurang lebih 2 tahun, penulis hendak melanjutkan kuliah sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Kimia pada tahun 2015 dan terdaftar dengan NRP 2315105028. Selama masa kuliah penulis sempat menjadi anggota penggerak aktif komunitas sosial “Sebung Surabaya”. Penulis juga pernah mendapatkan kesempatan untuk kerja praktek di PT. PERTAMINA RU II Dumai, Riau pada tahun 2016. Sebagai tugas akhir, penulis mengambil bidang perpindahan panas dan massa dengan spesialisasi teknologi aplikasi membran gas-cair di bawah bimbingan Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. dan Fadlilatul Taufany, S.T., P.hD. Semoga dengan penulisan skripsi ini mampu memberikan kontribusi positif bagi dunia pendidikan.

Hormat saya,

Yusuf Zaelana
081220725656
zaelanayusuf@gmail.com