SKRIPSI – TK141581

PEMISAHAN CO_2 MENGGUNAKAN KONTAKTOR MEMBRAN HOLLOW FIBER POLIPROPILENA DENGAN PELARUT MDEA TERAKTIVASI

Disusun Oleh:

Izhar Mirza Hardian
NRP. 02211440000 030

M Aziz Rahmatullah
NRP. 02211440000 095

Dosen Pembimbing:

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

Pembimbing II
Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D
NIP. 1984 0508 2009 12 2004

LABORATORIUM PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018

FINAL PROJECT– TK141581

CO_2 SEPARATION USING CONTACTOR MEMBRANE HOLLOW FIBER POLYPROPYLENE WITH ACTIVATED MDEA SOLVENTS

Proposed by :

Izhar Mirza Hardian
NRP. 02211440000 030

M Aziz Rahmatullah
NRP. 02211440000 095

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

Advisor II
Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D
NIP. 1984 0508 2009 12 2004

HEAT AND MASS TRANSFER LABORATORY
DEPARTEMENT OF CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2018

LEMBAR PENGESAHAN

PEMISAHAN CO_2 MENGGUNAKAN KONTAKTOR MEMBRAN *HOLLOW FIBER* POLIPROPILENA DENGAN PELARUT MDEA 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 :

Izhar Mirza Hardian **NRP : 02211440000 030**
M Aziz Rahmatullah **NRP : 02211440000 095**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Yeni Rahmawati, S.T., MT ..... (Pembimbing I)
2. Siti Nurkhamidah, S.T.,M.S.,Ph.D ..... (Pembimbing II)
3. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc. ..... (Penguji I)
4. Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D ..... (Penguji II)
5. Dr. Tantular Nurtono, S.T., M.Eng ..... (Penguji III)

KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA

Surabaya, Juli, 2018

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

PEMISAHAN CO_2 MENGGUNAKAN KONTAKTOR MEMBRAN *HOLLOW FIBER* POLIPROPILENA DENGAN PELARUT MDEA TERAKTIVASI

Disusun oleh : Izhar Mirza Hardian (02211440000 030)

M Aziz Rahmatullah (02211440000 095)

Dosen Pembimbing : Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.

Siti Nurkhamidah, S.T., M.S. Ph.D.

ABSTRAK

Teknologi kontaktor membran merupakan perkembangan pemisahan CO_2 yang menggabungkan proses absorpsi gas dengan pelarut dan teknologi membran sehingga pengaturan pola aliran dapat dilakukan untuk menghindari masalah operasional pada teknologi absorpsi konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh jenis pelarut terhadap proses absorpsi dan desorpsi CO_2, serta mempelajari pengaruh parameter operasi (laju alir gas, dan tekanan desorpsi) terhadap laju perpindahan massa (fluks) absorpsi, desorpsi dan %CO_2 removal absorpsi dan %desorpsi CO_2 menggunakan kontaktor membran *hollow fiber* polipropilena (PP). Pada proses absorpsi, pelarut dialirkan pada bagian tube dengan laju alir tetap 100 ml/menit dan gas umpan dialirkan pada bagian shell membran dengan variasi laju alir 200-600 ml/menit, kemudian pelarut yang kaya akan CO_2 dipanaskan hingga 70°C dan masuk kedalam proses desorpsi dengan variasi tekanan vakum 88 kPa – 34 kPa. Konsentrasi gas CO_2 yang masuk dalam sales gas serta gas CO_2 di dalam pelarut dianalisa

menggunakan titrasi chittic. Dari hasil penelitian pelarut terbaik yang menghasilkan fluks dan efisiensi pemisahan tertinggi adalah MDEA teraktivasi, dimana untuk proses absorpsi dan desorpsi pelarut terbaik adalah MDEA-PZ. Berdasarkan parameter operasinya, semakin besar laju alir gas umpan maka semakin tinggi fluks absorpsi dan berbanding terbalik dengan efisiensi pemisahan absorpsi CO_2 yang semakin rendah menghasilkan nilai fluks tertinggi sebesar $0{,}38 \times 10^{-4}$ mol/m^2.detik dan % CO_2 removal absorpsi tertinggi pada laju alir gas 600ml/min sebesar 96,9% dengan pelarut MDEA-PZ. Sedangkan untuk proses desorpsi semakin rendah tekanan vakum operasi maka semakin tinggi fluks desorpsi dan % desorpsi CO_2 menghasilkan nilai fluks tertinggi sebesar $0{,}311 \times 10^{-4}$mol/m^2.detik dan % desorpsi CO2 desorpsi tertinggi sebesar 20,9 % dengan pelarut MDEA-PZ.

Kata kunci : *kontaktor membran, absorpsi, desorpsi, amin, aktivator, pemisahan CO_2*

CO_2 SEPARATION USING CONTACTOR MEMBRANE HOLLOW FIBER POLYPROPYLENE WITH ACTIVATED MDEA SOLVENTS

Proposed by : Izhar Mirza Hardian (02211440000 030)

M Aziz Rahmatullah (02211440000 095)

Advisors : Dr. YeniRahmawati, S.T., M.T.

Siti Nurkhamidah, S.T., M.S. Ph.D.

ABSTRACT

Membrane contactor technology is an improvement of CO_2 removal technology combining gas absorption process with solvent and membrane technology in order to set the pattern of flow rate for avoiding operational problem that occure in conventional absorption technology. The research aims to study the influence of solvent variation towards CO_2 absorption and desorption process, the influence of parameter operation (feed gas flow rate and vacuum pressure operation) towards CO_2 mass transfer (absorption flux and desorption flux) and % CO_2 removal absorption % desorption CO_2 using polypropylene (PP) hollow fiber membrane contactors. 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, and than solvent rich of CO_2 will be heated till 70°C and flows with vacuum condition about 88 kPa – 34 kPa. The concentration of CO_2 in gas sales and CO_2 in the solvent is analyzed using chittic titration. The result indicates that an activated MDEA is the best solvent to create highest flux and

separation efficiency. Besides, MDEA-PZ has shown the best result as a solvent for absorption and desorption process. According to the operation parameter, the higher the flow rate of feed gas is, the higher absorption flux will be, however, the CO_2 absorption separation efficiency inversely suggests a different result which goes lower. Absorption process apparently produces the highest flux value about 0.38x10-4mol/m^2.second and the highest % CO_2 removal absorption at gas flowrate 600ml/min is about 96.9%. Meanwhile on the desorption process, the lower the vacuum pressure operation, the higher desorption flux and % desorption CO_2 will be. It produces highest flux value about 0,311x10^{-4} mol/m^2.second and the highest value of % desorption CO2 about 20.9 %.

Keywords : *membrane contactor, absorption, desorption, amine, activator, CO2 separation*

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah kehadirat Allah SWT Yang Maha Mengetahui terhadap setiap yang ada di bumi dan di langit, hanya karena rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi ini berjudul "Pemisahan CO2 menggunakan Kontaktor Membran Hollow Fiber Polipropilena dengan Pelarut MDEA Teraktivasi"

Penulisan proposal skripsi ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya 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 Perpindahan Panas dan Massa departemen Teknik Kimia FTI-ITS.
3. Ibu Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing 1 yang telah banyak memberikan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
4. Ibu Siti Nurkhamidah, S.T, N.Sc selaku dosen pembimbing 2 telah banyak memberikan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
5. Kedua orang tua dan seluruh keluarga besar yang selalu mendoakan, memberikan dukungan, dan semangat kepada penulis mulai awal perkuliahan hingga mengerjakan skripsi ini.
6. Seluruh anggota Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa departemen Teknik Kimia FTI-ITS 2017/2018 yang telah membantu dan memberikan semangat selama penulis mengerjakan skripsi ini.

7. Rekan-rekan Teknik Kimia terutama angkatan 2014 (K-54) yang telah banyak membantu hingga terselesainya skripsi ini dan semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu

Skripsi ini tentunya masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran demi penyempurnaan skripsi ini. Akhirnya, penulis berharap agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

Abstrak i
Abstract ii
Kata Pengantar v
Daftar Isi.....vii
Daftar Gambar.....x
Daftar Tabel.....xii
BAB I PENDAHULUAN
I.1 Latar Belakang 1
I.2 Perumusan Masalah..... 4
I.3 Batasan Masalah..... 4
I.4 Tujuan Penelitian..... 5
I.5 Manfaat Penelitian..... 5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA
II.1 Karbon Dioksida (CO_2) 7
II.1.1 Karbon Dioksida (CO_2)..... 7
II.1.2 Pemanfaatan CO_2 8
II.1.3 Keberadaan CO_2 dalam Emisi Gas Industri 8
II.2 Teknologi Pemisahan CO_2 dari Gas Alam…….9
II.2.1 Teknologi Absorpsi Konvensional……9
II.2.2 Teknologi Adsorpsi.....10
II.2.3 Teknologi Distilasi Kriogenik.....11

II.2.4 Teknologi Membran Permeasi……..11
II.3 Absorpsi CO_2 Menggunakan Kontaktor Membran Serat Berongga 12
II.4 Parameter Operasi pada Kontaktor Membran . 17
II.5 Pola Aliran Gas dan Pelarut..... 20
II.6 Material Membran 21
II.7 Pemilihan Pelarut Alkanolamina 23
II.8 Aktivator yang digunakan dalam Absorpsi CO_2 26
II.9 Posisi Penelitian (*State of Art*)..... 28
BAB III METODE PENELITIAN
III.1 Garis Besar Penelitian ……...33
III.2 Bahan yang Digunakan..... 34
III.3 Variabel Penelitian 34
III.3.1 Kondisi yang Ditetapkan 34
III.3.2 Variabel Masukan..... 35
III.3.3 Variabel Respon 35
III.4 Rangkaian Alat Penelitian 35
III.5 Prosedur Penelitian..... 37
III.5.1 Proses Absorpsi CO_2..... 37
III.5.2 Proses Desorpsi CO_2..... 37
III.6 Prosedur Analisa Hasil Penelitian 39
III.6.1 Analisa Kosentrasi Gas CO2 Dalam Gas Masuk dan Keluar Modul Membran... 39

III.6.2 Analisa Kosentrasi Gas CO_2 Dalam Pelarut Keluar Modul Membran 41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN
IV.1 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Laju Perpindahan Massa CO_2 (Fluks Absorpsi)..... 44
IV.2 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Persen CO_2 *Removal* 49
IV.3 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO_2 *Loading* 50
IV.4 Pengaruh Operasi Tekanan Vakum terhadap Fluks Desorpsi 52
IV.5 Pengaruh Operasi Tekanan Pompa Vakum terhadap CO_2 *Removal* Desorpsi 53
IV.6 Pengaruh Operasi Tekanan Vakum terhadap CO_2 *Loading* 54
BAB V KESIMPULAN
V.1 Kesimpulan 56
V.2 Saran 57
DAFTAR PUSTAKA..... xiii
APPENDIKS xix
LAMPIRAN GAMBAR..... xli
DAFTAR NOTASI xliii

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Kolom absorpsi konvensional dengan *packing*.....9
Gambar II.2 Kolom adsorpsi 10
Gambar II.3 Permeabilitas berbagai senyawa gas melalui membran 11
Gambar II.4 Kontaktor Membran Serat Berongga 13
Gambar II.5 Proses pemisahan CO_2 menggunakan kontaktor membran 14
Gambar II.6 Studi Perpindahan Massa Kontaktor Membran 15
Gambar II.7 Pola aliran pada kontaktor membran 21
Gambar II.8 Struktur kimia membran polipropilena (PP).....22
Gambar III.1 Rangkaian alat kontaktor membran untuk absorpsi-desorpsi CO_2 36
Gambar III.2 Diagram alir penelitian 39
Gambar III.3 Skema neraca massa CO_2 untuk proses absorpsi dan desorpsi 40
Gambar III.4 Skema alat titrasi *chittic* 42
Gambar IV.1 Pengaruh laju alir gas umpan terhadap fluks absorpsi CO_2 pada berbagai jenis pelarut (CO_2 : 20% vol ; $Q_{pelarut}$ = 100 ml/menit).....44
Gambar IV.2 Profil konsentrasi gas CO_2 pada perpindahan massa gas CO_2 dari fasa gas ke fasa liquid.....45

Gambar IV.3 Mekanisme aktivasi dari aktivator pada pelarut MDEA-PZ.....47
Gambar IV.4 Pengaruh laju alir gas umpan terhadap % CO_2 *removal* pada berbagai jenis pelarut (CO_2 20% volume ; $Q_{pelarut}$ = 100 ml/menit).....49
Gambar IV.5 Pengaruh laju alir gas umpan terhadap CO_2 *loading* pada berbagai jenis pelarut (CO_2 20% volume ; $Q_{pelarut}$ = 100 ml/menit).....50
Gambar IV.6 Pengaruh operasi tekanan vakum terhadap fluks desorpsi pada berbagai jenis pelarut (CO_2 Loading = ± 0,14 ; $Q_{pelarut}$ = 100 ml/menit).....52
Gambar IV.7 Pengaruh operasi tekanan vakum terhadap % CO_2 *Removal* Desorpsi pada berbagai jenis pelarut (CO_2 Loading = ± 0,14 ; $Q_{pelarut}$ = 100ml/menit).....53
Gambar IV.8 Pengaruh operasi tekanan vakum terhadap CO_2 Loading pada berbagai jenis pelarut (CO_2 Loading = ± 0,14 ; $Q_{pelarut}$ = 100ml/menit)).....54

DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Sifat fisika karbondioksida (CO_2) 7
Tabel II.2 Komposisi Gas CO_2 pada flue gas industri..... 8
Tabel II.3 Termperatur transisi gelas (*Tg*) polimer 22
Tabel II.4 Perbandingan Pelarut Alakanolamina..... 24
Tabel II.5 Karakteristik *Piperazine* (*Pz*) 27
Tabel II.6 Karakteristik *Monosodium Glutamate* (*MSG*)..... 27
Tabel II.7 Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO_2 Menggunakan Kontaktor Membran..... 28
Tabel III.1 Data Karakteristik Membran Polipropilena..... 34

BAB I
PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara berkembang dengan jumlah penduduk yang besar. Dengan jumlah penduduk yang besar, dibutuhkan lapangan pekerjaan yang luas. Demi menunjang pertumbuhan ekonomi Indonesia, pemerintah memfokuskan untuk perluasan perkembangan industri. Oleh karena itu pada tahun 2015 Indonesia mendapat julukan Negara Industri Baru.

Berkembangnya industri di Indonesia selain memberikan efek perkembangan ekonomi yang meningkat drastis, ternyata mempunyai dampak buruk terhadap lingkungan. Limbah gas dari industri dapat menyebabkan polusi udara. Kandungan yang terdapat pada limbah gas buang industri antara lain CO_2, SOx, NOx, CO, dan HC. Komposisi prosentase emisi gas buang industri yaitu 30% gas CO2, 27% gas CO, 25% gas HC, 10% gas NOx 9% gas SOx, dan 8% partikulat debu.

Karbon Dioksida (CO_2) merupakan sumber masalah utama fenomena pemanasan global, yang kini merupakan tantangan terbesar yang dihadapi oleh seluruh masyarakat dunia. Salah satu usaha untuk mengendalikan emisi greenhouse gas yang populer dilakukan saat ini adalah penghilangan CO_2 dari flue gas, yang diharapkan dapat menjadi faktor penghambat pemanasan global.

Beberapa teknologi telah tersedia secara komersial dalam skala industri untuk memisahkan CO_2 dari aliran gas, di antaranya absorpsi unggun tetap, adsorpsi molecular sieve, distilasi cryogenic, dan yang paling mutakhir adalah membran gas permeasi. Hingga saat ini, teknologi yang paling banyak digunakan dalam pemisahan CO_2 adalah absorpsi menggunakan larutan alkanolamin pada peralatan kontak konvensional berupa kolom unggun tetap maupun tray. Namun, selain membutuhkan

ruang yang luas, proses ini memerlukan initial investment cost yang tinggi. Sementara itu, aplikasi membran baik untuk separasi cairan maupun gas telah berkembang pesat sehingga mendorong kemajuan teknologi pemurnian gas. Teknologi membran bahkan telah mampu menggantikan teknologi konvensional pada beberapa kasus pemisahan gas spesifik, misalnya pada aplikasi pemurnian oksigen (O_2) dan pemulihan hidrogen (H_2). Dalam perkembangannya, proses absorpsi gas-cairan berbasis membran telah dipertimbangkan sebagai alternatif proses pemisahan CO_2 dari aliran gas.

Dewasa ini, telah banyak dilakukan pengembangan penelitian absorpsi-desorpsi menggunakan kontaktor membran dalam pemisahan gas campuran, terutama pemisahan gas CO_2 dari gas alam. Salah satu penelitian terdahulu yang pernah dilakukan adalah Yeon, dkk. (2004), melakukan absorpsi CO_2 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 piperazine. TEA adalah amina tersier dengan volatilitas yang tinggi dapat membantu membran serat berongga terjaga dari fenomena pembasahan. Kemudian pada tahun 2007 sebuah penelitian menyebutkan absorben yang dapat digunakan dalam absopsi CO_2 menggunakan kontaktor membran serat berongga ini adalah air, NaOH, KOH, MEA, DEA, MDEA, K_2CO_3, garam dari amina (Lu dkk. 2006), dan disebutkan juga bahwa pelarut alkanolamina masih menjadi pelarut yang paling baik. Banyak penelitian absorpsi-desorpsi CO2 dengan kontaktor 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 Hedayat, dkk. (2011) melakukan penelitian untuk absorpsi gas CO_2 dan H_2S dari gas alam menggunakan kontaktor

membran dengan membandingkan pelarut MDEA dicampur dengan MEA dan MDEA dengan DEA. Dari hasil peneletiannya, penambahan MEA ke dalam MDEA dapat meningkatkan efisiensi pemisahan CO2, sedangkan penambahan DEA tidak memberikan hasil yang signifikan.

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 (Kohl & Nielsen, 1997).

Hafan dan Yusuf (2017) melakukan penelitian mengenai kontaktor membran hollwo fiber polipropilena untuk proses absorpsi-desorpsi CO_2 menggunakan pelarut dietanolamina (DEA) dengan penambahan aktivator piperazine dan arginine. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar laju alir gas umpan maka semakin tinggi fluks absorpsi dan berbanding terbalik dengan efisiensi pemisahan absorpsi CO_2. efisiensi pemisahan absorpsi CO_2 tertinggi sebesar 97,55% dengan pelarut DEA-PZ. efisiensi pemisahan desorpsi CO_2 tertinggi sebesar 77,48% dengan pelarut DEA-Arginin. Efisiensi pemisahan absorpsi CO2 terbaik pada 60 menit pertama dan mulai konstan untuk menit berikutnya.

Penelitian mengenai pelarut pada kontaktor membran dengan harga yang ekonomis, memiliki tingkat efisiensi yang tinggi terhadap pemisahan CO_2, serta kemampuan regenerasi yang baik sangat diminati oleh kalangan ilmuwan maupun pihak industri. Maka dari itu dilakukan penelitian tentang "Pemisahan CO_2 Menggunakan Kontaktor Membran Hollow Fiber Polipropilena dengan Pelarut MDEA Teraktivasi". Pelarut yang digunakan

adalah Methyl Diethanolamine (MDEA) dengan penambahan aktivator, monosodium glutamate dan Piperazine. Penggunaan campuran pelarut amina tersebut diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pemisahan CO_2 dan mengurangi biaya penggunaan pelarut sehingga lebih ekonomis.

Pengamatan dilakukan untuk mengetahui pengaruh parameter operasi berupa suhu pelarut dan variasi jenis pelarut teraktivasi terdapat laju perpindahan massa absorpsi-desorpsi CO_2 (fluks) dan efisiensi pemisahan CO_2 dengan modul membran kontaktor. Dari hasil penelitian diharapkan dapat mengetahui parameter optimal untuk proses absorpsi-desorpsi dengan nilai efisiensi tertinggi.

I.2 Perumusan Masalah

Dari uraian latar belakang diatas, maka bisa dirumuskan permasalahan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh jenis aktivator terhadap proses absorpsi dan desorpsi CO2 menggunakan kontaktor membran.

2. Bagaimana pengaruh parameter operasi (laju alir gas umpan absorpsi dan tekanan vakuum desorpsi) terhadap laju perpindahan massa (fluks) dan %CO2 removal absorpsi serta %desorpsi CO2 menggunakan modul kontaktor membran

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 berbeda atau secara terpisah.
3. Pelarut yang digunakan adalah campuran dari golongan amina tersier (MDEA) dengan aktivatornya, seperti monosodium glutamate dan Piperazine dengan laju alir sesuai variabel dan dipanaskan pada variabel suhu tertentu.

4. Proses desorpsi dilakukan dengan variasi tekanan vakum.
5. Laju alir gas, laju alir pelarut, dan konsentrasi gas umpan CO2, serta tekanan diatur sesuai variabel penelitian.

I.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini, yaitu :

1. Mempelajari pengaruh jenis aktivator terhadap proses absorpsi dan desorpsi CO2 menggunakan kontaktor membran.
2. Mempelajari pengaruh parameter operasi laju alir gas umpan absorpsi terhadap laju perpindahan massa (fluks) dan %CO2 removal absorpsi menggunakan modul kontaktor membran.
3. Mempelajari pengaruh parameter operasi tekanan desorpsi terhadap laju perpindahan massa (fluks) dan %desorpsi CO2 menggunakan modul kontaktor membran.

I.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

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

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Karbon Dioksida (CO_2)

II.1.1 Karbon Dioksida (CO_2)

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

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \qquad \text{(II.1)}$$

Karbon dioksida berubah fasa menjadi padat pada suhu -78.51˚C atau -109.3˚F pada tekanan atmosfer. Densitas CO_2 pada keadaan standar ialah 1.98 kg/m^3.

Tabel II.1 Sifat fisika karbondioksida (CO_2)

Sifat	Nilai
Titik didih	-57,5 ºC
Titik beku normal	-78,4 ºC
Temperatur kritis	38 ºC
Tekanan kritis	0,6 Kg/cm^2.G
Panas peleburan	1900 Kal/mol
Panas penguapan	6030 Kal/mol

(*Sumber: Perry, 2008*)

Karbon diosida juga bersifat toksik pada kosentrasi yang tinggi. Efek yang ditimbulkan oleh CO_2 ialah sebagai berikut :

a. Konsentrasi 1% CO_2 dapat menyebabkan terpaparnya CO_2 dalam paru-paru.
b. Konsentrasi 2% CO_2 menyebabkan tekanan darah naik, detak jantung tudak teratur, dan mengurangi efektifitas pendengaran.

c. Konsentrasi 5% CO_2 menyebabkan gangguan pernafasan, pusing, sakit kepala, efek panik, sulit untuk bernafas.
d. Konsentrasi 8% CO_2 dapat menyebabkan sakit kepala berat, tremor, hilang kesadaran, penglihatan kabur dan berkeringat.

II.1.2 Pemanfaatan CO_2

Selain memiliki dampak negatif, CO_2 juga memiliki manfaat yang luas seperti:

a. Sistem pneumatik
b. Pemadam api
c. Pengelasan
d. Proses kimia dan farmasi
e. Aplikasi laser
f. Refrigerasi
g. EOR (*Enhanced Oil Recovery*)

Sehingga CO_2 juga merupakan komoditas yang potensial untuk diambil dari gas alam.

II.1.3 Keberadaan CO_2 dalam Emisi Gas Industri

Gas CO_2 merupakan salah satu penyebab utama dalam permasalahan efek rumah kaca saat ini. Salah satu faktor utama terjadinya efek rumah kaca disebabkan gas emisi yang dihasilkan dari proses industri cukup besar. Berikut contoh komposisi CO_2 dalam flue gas industri sebagai berikut :

Tabel II.2 Komposisi Gas CO_2 pada flue gas industri

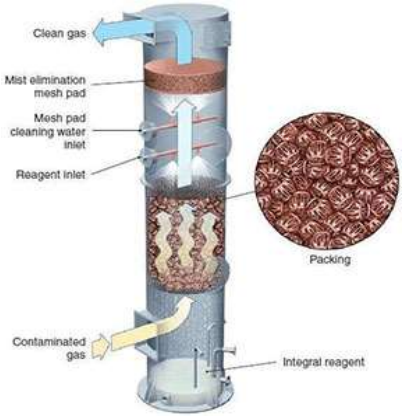
Bahan Bakar	kandungan CO_2 pada flue gas
Batu bara	12-15 %
Natural gas	3-4 %
Proses Industri	
Oil refining	8-9%
Semen	14-33 %
Besi dan baja	20-44 %

(Sumber : *songolzadeh dkk*, 2013)

II.2 Teknologi Pemisahan CO_2 dari Gas Alam

II.2.1 Teknologi Absorpsi Konvensional

Pemisahan CO_2 dengan absorpsi merupakan 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 CO_2 dalam pelarut yang sesuai. Kelarutan CO_2 dalam absorben yang tinggi dibandingkan hidrokarbon akan menghasilkan produk gas alam keluaran yang bersih dari CO_2. Untuk dapat mengabsorpsi CO_2 maka absorben (pelarut) dan *sour gas* haruslah dikontakkan didalam kontaktor kolom.



Gambar II.1 Kolom absorpsi konvensional dengan *packing*

(Sumber : http://encyclopedia.che.engin.umich.edu)

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 CO_2 akan larut dalam absorben (biasanya senyawa alkanoamina).

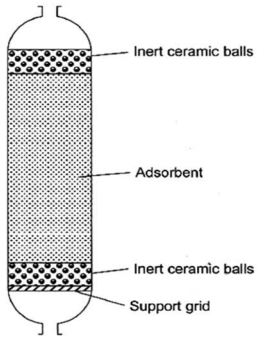
Namun kontaktor kolom yan berupa *packed column* ataupun *tray column* memiliki berbagai kekurangan seperti terbentuknya *floading*, *entraining*, *foaming*, *channeling*, serta sulit dalam penentuan batasan dari mass transfer area dan flow rate dari variabel gas dan liquid. (Lu dkk, 2007; Mansourizadeh dan Ismail, 2009).

II.2.2 Teknologi Adsorpsi

Pemisahan dengan adsorpsi menggunakan prinsip penyerapan CO_2 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.



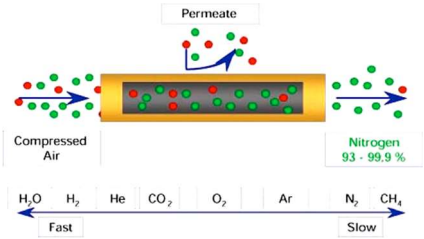
Gambar II.2 Kolom adsorpsi
(sumber : http://www.cchem.berkeley.edu)

II.2.3 Teknologi Distilasi Kriogenik

Distilasi kriogenik adalah destilasi pada suhu yang sangat rendah, mencapai -180˚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 realitif senyawa melewati membran, secara khusus untuk komposisi gas alam diilustrasikan oleh gambar berikut :



Gambar II.3 Permeabilitas berbagai senyawa gas melalui membran (Sumber: http://igs-global.de)

Sehigga, jika gas alam dilewatkan melalui membran maka CO_2 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, kosentrasi, temperatur antara dua fluida, maupun perbedaan potensial listrik.Namun teknologi ini mempunyai beberapa kelemahan, yaitu selektivitasnya yang bururk dan penurunan tekanan yang sangat besar. Selektivitas dari membran yang buruk menyebabkan banyak hidrokarbon yang hilang ikut terlewat bersama-sama dengan CO_2. Hal ini tentunya menyebabkan kerugian yang relatif besar.

II.3 Absorpsi CO_2 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 alamakan dikontakkan melalui lapisan membran dengan diameter porositas tertentu. Perbedaan permeabilitas komposisi gas alam juga akan mempengaruhi absorpsi.

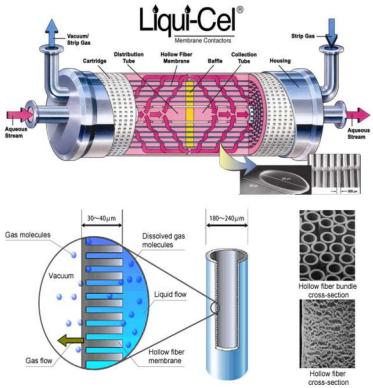
Absorpsi CO_2 dengan menggunakan membran serat berongga ini memiliki kelebihan yaitu seperti :

1. Memiliki luas kontak gas-liquid yang lebih besar. Luas permukaan kontak gas-cairan untuk *packed column* mendekati 100-800 m^2/m^3, sedangkan kontaktor membran *hollow fiber* bisa mencapai 1.500-3.000 m^2/m^3 (Rostami dkk, 2018).
2. Ukuran alat yang lebih kecil.
3. Bersifat modular yaitu mudah untuk di-*scale up* (Lu dkk, 2007).
4. Laju alir gas dan liquid dapat diatur dengan mudah secara independen sehingga dapat mengatasi masalah operasional (Mansourizadeh dan Ismail 2009).

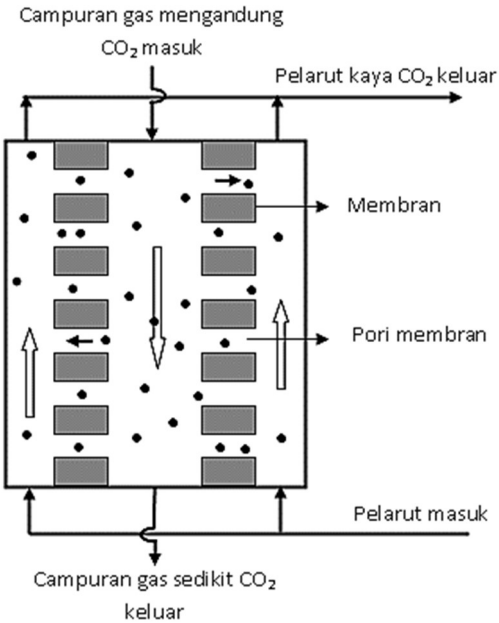
5. Kelebihan teknologi ini dibanding teknologi absorpsi gas-cairan konvensional adalah terpisahnya aliran gas dan cairan sehingga pengaturan pola aliran dapat bersifat fleksibel untuk menghindari kemungkinan *flooding*, *loading*, dan *entrainment* yang umum terjadi pada teknologi konvensional (Gabelman dan Hwang, 1999).

Meskipun membran serat berongga memiliki kelebihan seperti yang disebutkan diatas, 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.



Gambar II.4 Kontaktor Membran Serat Berongga
(sumber: http://www.asdpure.com)



Gambar II.5 Proses pemisahan CO_2 menggunakan kontaktor membran (Widyawati dan Intan, 2016)

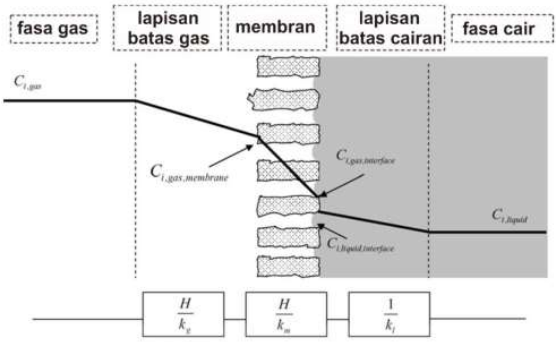
Teknologi kontaktor membran untuk pemisahan CO_2 merupakan pengembangan membran poros hidrofobik sebagai media pembatas yang membantu kontak dua fluida untuk tujuan perpindahan massa tanpa terjadi dispersi dari satu fasa ke fasa lainnya. Kelebihan teknologi ini dibanding teknologi absorpsi konvensional adalah luas permukaan per volume tinggi sehingga kemungkinan untuk terjadinya perpindahan massa lebih besar (Rahmawati, dkk., 2014). Proses pemisahan CO_2 menggunakan kontaktor membran disajikan pada Gambar II.5.

Absorpsi CO_2 dengan menggunakan membran didasarkan atas terjadinya kontak gas-cair melalui membran mikroporous yang hidrofobik. Membran ini membentuk penghalang yang *permeable* antara fasa gas dan fasa cair sehingga perpindahan massa tidak disertai dengan dispersi antara satu fasa dengan fasa

yang lainnnya. Dinding dari membran hidrofobik berfungsi untuk memisahkan fasa gas dan fasa cair namun komponen gas akan berdifusi melalui pori-pori membran dan terabsorpsi ke dalam fasa cair. Perpindahan masa pada proses absorpsi CO_2 ini dipengaruhi oleh :

1. Difusi CO_2 dari fasa gas ke permukaan membran.
2. Difusi CO_2 melewati pori membran ke permukaan cairan.
3. Pelarutan CO_2 ke dalam absorben diikuti difusi ataupun reaksi kimia.

Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar II.6 seperti berikut :



Gambar II.6 Studi Perpindahan Massa Kontaktor Membran (zhang dkk, 2008)

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.

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

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., 1993)

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{k_{il}E} + \frac{1}{k_{im}H} + \frac{1}{k_{ig}H} \tag{II.3}$$

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:

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

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 CO_2 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 CO_2**,** ada beberapa variabel operasi yang dapat mempengaruhi proses pemisahan berdasantara lain :

1. **Laju alir cairan**

   Hasil Kim & Yang (2000) menunjukkan bahwa peningkatan koefisien perpindahan massa pada kontaktor membran berbanding lurus dengan laju alir pelarut karena beda konsentrasi pada sisi gas dan cairan semakin tinggi sehingga jumlah CO_2 yang diserap semakin besar. Berdasarkan penelitian dari Kim dan Yang (2000), pada laju reaksi yang tinggi, konsentrasi CO_2 di bagian cairan keluar lebih tinggi jika laju alir cairan lebih rendah, sehingga konsentrasi CO_2 akan menurun dengan meningkatnya laju alir pelarut. Selain itu Lu, 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. Kumar dkk. (2002) melaporkan bahwa pada temperatur ruang, tekanan parsial CO_2 mempunyai pengaruh linear terhadap fluks CO_2. Sedangkan pada penelitian Marzouk dkk. (2010) menunjukkan hasil bahwa dengan adanya kenaikan hingga tekanan dari 0 bar sampai 50 bar pada Feed gas, juga menunjukkan kenaikan pada CO_2 fluks serta persen CO_2 *removal*.

5. **Tekanan campuran gas**

   Tekanan gas bisa dimanfaatkan untuk mengatasi permasalahan pembasahan pori membran oleh cairan. Penurunan fluks dan koefisien perpindahan massa terjadi karena adanya hambatan perpindahan massa fiber meningkat akibat pembasahan membran. Jika tekanan gas ditingkatkan, maka cairan yg memasuki pori fiber membran akan didorong balik ke dalam lumen membran (Wang dkk, 2006). Hedayat dkk. (2011) melaporkan bahwa

setelah operasi absorpsi selama 14 hari, efisiensi absorpsi dapat meningkat kembali dengan menaikkan tekanan gas. Namun, kenaikan tekanan gas dibatasi oleh tekanan kritis gelembung (*bubbling*) (ΔP_b). Jika tekanan gas dinaikkan melebihi ΔP_b, maka akan terjadi gelembung di sisi cairan.

6. **Tekanan operasi**

   Dindore dkk. (2004) melakukan percobaan pemisahan CO_2 menggunakan kontaktor membran hingga tekanan 20 bar, diperoleh hasil bahwa fluks akan meningkat dengan meningkatnya tekanan operasi. Namun, tekanan operasi tidak berpengaruh terhadap kofisien 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 CO_2 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**

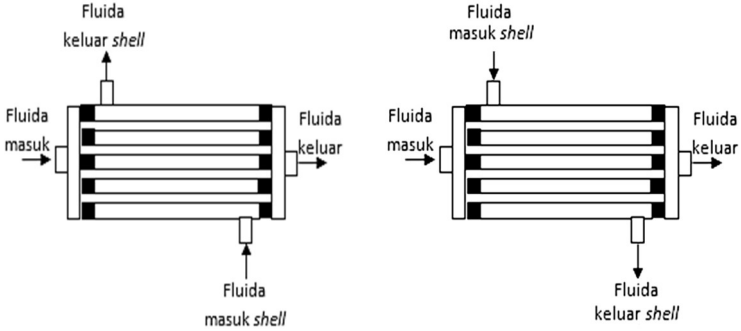
Modul kontaktor membran *hollow fiber* menyerupai alat perpindahan panas yang terdiri atas *shell* dan *tube*, dimana yang berfungsi sebagai *tube* adalah membran *hollow fiber* itu sendiri. Fluida dialirkan di bagian lumen dan bagian *shell* dari membran. Untuk kontaktor membran gas-cairan, cairan lebih 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 performane 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 CO_2 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 CO_2 (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 dimana terdapat 2 jenis aliran, yaitu aliran *co-current* dan aliran *counter current.*



(a) Aliran *co-current* (b) Aliran *counter-current*

Gambar II.7 Pola aliran pada kontaktor membran (zheng, dkk. 2005)

II.6 Material Membran

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

1. **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.

2. **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.

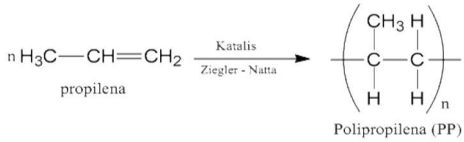
Temperatur transisi gelas polimer ditentukan oleh struktur kimia seperti fleksibilitas dan interaksi ikatan rantai. Polimer yang mempunyai T_g lebih tinggi cenderung lebih stabil. Dalam Tabel II.3 ditunjukkan bahwa PTFE memiliki T_g lebih tinggi dibandingkan PET dan PP sehingga sifatnya lebih stabil.

Tabel II.3 Temperatur transisi gelas (T_g) polimer

Polimer	T_g (°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 penetian ini, membran yang digunakan adalah membran sintetik yang terbuat dari salah satu jenis polimer, yaitu poliprolena (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 menggangu reaksi anatara CO_2 dengan absorben senyawa amina pada proses absorpsi. Gamabr II.10 berikut menggambarkan struktur dari monomer dan polimer polipropilena.



Gambar II.8 Struktur kimia membran polipropilena (PP)

Polipropilen 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 CO_2 cenderung menurun sampai akhirnya bernilai konstan. Hal ini menunjukkan bahwa membran mengalami pembasahan pada awal percobaan dan kemudian stabil.

II.7 Pemilihan Pelarut Alkanolamina

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

a. Reaktivitas gas yang tinggi (*reactivity*)
b. Kemampuan mengabsorpsi
c. Performa regenerasi terhadap CO_2
d. Tegangan permukaan yang tinggi
e. Viskositas yang rendah
f. Kompabilitas terhadap material membran

Pada absorben tunggal, kemampuan penyerapan CO_2 dari berbagai jenis pelarut adalah NaOH > TEPA > GLY > MEA > DEA > DIPA > AMP > TEA > MDEA > K_2CO_3. Namun apabila diurutkan berdasarkan kemampuan regenerasi CO_2 (untuk mengurangi energi dan mendaur ulang absorben) adalah TEA > MDEA > DEA > AMP > DIPA > MEA > NaOH. Data ini menunjukkan adanya jenis pelarut yang memiliki performa absorpsi CO_2 yang baik namun sulit diregenerasi, begitupun sebaliknya. Oleh karena itu dikembangkan berbagai jenis pelarut yang ditambahkan aktivator yang mampu meningkatkan absorpsi CO_2.

Dalam pemisahan CO_2 dari gas alam, senyawa alkaolamina adalah pelarut yang paling banyak digunakan pada proses

absorbsi CO_2 sebagai absorben, karena senyawa ini dapat bereaksi dengan CO_2 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 absorbsi CO_2.

Senyawa alkanolamina yang digunakan sebagai absorben pada absorpsi CO_2 penelitian ini merupakan *Tertiary amine* (MDEA) yang memiliki tingkat regenerasi CO_2 yang lebih tinggi dari jenis pelarut alkanoamina lainnya dan tidak bersifat korosif dimana perbandingan dengan pelarut amine lainnya ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel II.4 Perbandingan Pelarut Alakanolamina

Pelarut	Kelebihan	Kekurangan
Monoethanole Amine (MEA)	• Sangat reaktif terhadap CO_2 dan H_2S. • Mampu menghilangkan CO_2 dan H_2S secara bersamaan. • *Recovery* CO_2 dan H_2S tinggi. • Harganya paling murah dibanding pelarut amin lainnya.	• Alat rentan mengalami korosi, terutama jika konsentrasinya di atas 20%wt. • Mengalami reaksi *irreversible* dengan COS dan CS_2 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.

Diethanole Amine (DEA)	• Tekanan uapnya lebih rendah dibanding MEA sehingga mengurangi kehilangan massa saat regenerasi. • Dapat digunakan untuk absorpsi gas yang yang mengandung COS dan CS_2.	• Dapat bereaksi dengan CO_2 secara *irreversible* sehingga pelarut ini tak optimal jika digunakan untuk absorpsi gas dengan kandungan CO_2 yang tinggi.
Methyl Diethanole Amine (MDEA) dan *Triethanole Amine* (TEA)	• Tekanan uapnya sangat rendah sehingga dapat digunakan dengan konsentrasi sampai 60%wt. • Sangat selektif terhadap H_2S. • Tidak korosif. • Banyak digunakan untuk absorpsi dengan kandungan CO_2 yang tinggi. • Energi untuk regenerasi rendah.	• Akibat keselektifannya yang tinggi terhadap H_2S, maka akan terjadi CO_2 *slippage* sehingga absorpsi CO_2 kurang maksimal. Oleh karena itu pelarut ini biasanya digunakan untuk absorpsi gas CO_2 tanpa adanya H_2S. • Harganya paling mahal di antara pelarut amin lainnya.

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

II.8 Aktivator yang digunakan dalam Absorpsi CO_2

Karena rendahnya laju reaksi pemisahan CO_2 oleh alkanolamina, maka dibutuhkan sejumlah aktivator untuk meningkatkan proses absorpsi. Senyawa kimia yang dapat digunakan untuk meningkatkan laju reaksi seperti *piperazine* dan MSG. Mekanisme reaksi dari larutan teaktivasi secara umum sebagai berikut :

CO2 + aktivator ↔ intermediate

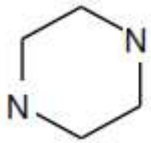
Intermediate + OH^- ↔ aktivator + HCO_3^-

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

Salah satu campuran larutan amin sebagai aktivator adalah *piperazine* (PZ) yang digunakan sebagai kombinasi dengan MDEA. Kemampuan larutan aktivasi dalam menghilangkan karbon dioksida ditentukan oleh kesetimbangan larutan dan juga transfer massa serta karakteristik kinetiknya.

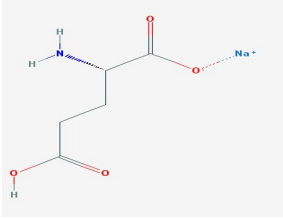
Berbagai penelitian mengenai pelarut teraktivasi sebenarnya sudah dilakukan pada penelitian terdahulu. Seperti pada penelitian Lu dkk (2007) yang menggunakan pelarut amin teraktivasi yakni MDEA-AMP dan MDEA-PZ untuk mengabsorpsi CO_2. Dari penelitian tersebut menunjukkan CO_2 fluks pada pelarut yang teraktivasi lebih tinggi daripada pelarut MDEA yang tidak teraktivasi. Sedangkan pada penelitian Ningsih dkk (2017) mengenai absorpsi CO_2 pada packed column menggunakan pelarut K_2CO_3 menggunakan aktivator MSG juga menunjukkan hasil yang hampir serupa. Dimana CO_2 *removal* meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi aktivator MSG pada pelarut. Karakteristik dari PZ dan MSG dijelaskan pada Tabel II.5 dan II.6 seperti berikut.

Tabel II.5 Karakteristik *Piperazine* (*Pz*)

Sinonim :	Piperazine Anhydrous, Diethylenediamine
Rumus Molekul :	$C_4H_{10}N_2$
Berat	86,13
Nomor Register :	110-85-0
Densitas	146
Melting point :	108-112ºC
Boiling point :	145-146ºC
Flash point :	82ºC
Struktur	

Sumber : Rob Lensen, 2004 : 12

Tabel II.6 Karakteristik *Monosodium Glutamate* (MSG)

Sinonim :	Monosodium Glutamate
Rumus Molekul :	$C_5H_8NaNO_4$
Berat	169,112
Nomor Register :	142-47-2
Densitas	26,2
Melting point :	450ºF
Boiling point :	225ºC
Flash point :	Tidak tersedia, akan tetapi *combustible*
Struktur	

Sumber : pubchem.ncbi.nlm.nih.gov

II.9 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 CO_2 menggunakan kontaktor membran serat berongga dengan pelarut terkativasi 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.7 Penelitian Terdahulu Mengenai Absorpsi-Desorpsi CO_2 Menggunakan Kontaktor Membran

Material/ Proses/ Pelarut	Penelitian	Hasil	Referensi
PVDF/ hibrid/ PZ dan TEA	Mempelajari absorpsi CO_2 dengan campuran pelarut alkanolamina (PZ/TEA) dan kinetika reaksi CO_2 dengan mencampurkan 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.	Peningkatan konsentrasi pelarut dan tekanan parsial CO_2 menunjukkan laju absorpsi CO_2 yang semakin tinggi. Kapasitas absorpsi dari campuran PZ dan TEA dengan CO_2 dipengaruhi oleh konsentrasi piperazine. Dari penelitian tersebut juga menunjukkan membran hollow fiber memiliki laju absorpsi CO_2 lebih baik hingga 1.8 kali lipat daripada *packed column*.	Yeon, dkk. (2004)

PTFE/ simultan dalam dua modul terpisah/ air	Absorpsi dan desorpsi dilakukan dengan kondisi operasi yang berbeda untuk mengetahui pengaruhnya terhadap efisiensi pemisahan gas CO_2.	Hasil penelitian menunkukkan bahwa efisiensi pemisahan CO_2 menunjukkan kenaikan yang signifikan dengan menaikkan suhu pelarut dan. Namun, meningkatkan laju alir pelarut akan menurunkan fluks desorpsi CO_2.	Mansou-rizadeh, dkk. (2011)
PP/ Simultan dalam satu modul/ DEA	Penelitian mengenai absorpsi dan desorpsi CO2 secara simultan dengan kontaktor membran *hollow fiber* polipropilena menyilang ganda pada tekanan vacum menggunakan pelarut DEA	Hasil yang diperoleh me-nunjukkan bahwa fluks absorpsi semakin besar yakni 2,3 x 10^{-3}mol/ms. Fluks desorpsi semakin besar, jika konsentrasi gas CO2 semakin kecil dan laju alir gas semakin besar.efisiensi absorpsi tertinggi 83,747 % sedangkan untuk desorpsi 4,873 %.	Rahmawati, dkk. (2015)

PVDF/ simultan dalam dua modul terpisah/ larutan garam asam amino	Membandingkan penggunaan empat macam laruan 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, meskipun dapat meningkatkan fluks.	Rahim, dkk. (2015)
PP/Simultan dalam dua modul terpisah/ DEA, DEA PZ, DEA Arginin	Mempelajari mengenai variasi jenis pelarut, variasi laju alir gas umpan, serta kinerja untuk proses absorpsi dan desorpsi secara kontinyu.	Semakin besar laju alir gas umpan maka semakin tinggi fluks absorpsi dan berbanding terbalik dengan efisiensi pemisahan absorpsi CO_2. efisiensi pemisahan absorpsi CO_2 tertinggi sebesar 97,55% dengan pelarut DEA-PZ. efisiensi pemisahan desorpsi CO_2 tertinggi sebesar	Hafan dkk, (2017)

		77,48% dengan pelarut DEA-Arginin. Efisiensi pemisahan absorpsi CO2 terbaik pada 60 menit pertama dan mulai konstan untuk menit berikutnya	
PP/Simultan dalam satu modul/ DEA	Penelitian mengenai pengaruh parameter operasi (konsentrasi CO_2, laju alir gas umpan dan laju alir pelarut DEA) terhadap pemisahan CO_2, serta kinerja membran secara kontinyu	Dari hasil penelitian diperoleh nilai efisiensi semakin besar bila laju alir gas umpan dan pelarut semakin besar, konsentrasi gas umpan semakin besar. Nilai efisiensi pemisahan tertinggi mencapai 61,64% dengan peforma terbaik pada 2 jam pertama.	Rahmawati dkk. 2017

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Garis Besar Penelitian

Garis besar pelaksanaan penelitian ini akan dilakukan secara eksperimen. Penelitian akan dilakukan di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, Teknik Kimia, ITS. Penelitian kontaktor membran untuk proses absorpsi dan desorpsi CO_2 menggunakan variasi pelarut amin teraktivasi bertujuan antara lain, pertama mempelajari jenis pelarut terhadap proses absorpsi dan desorpsi CO_2 kedua mempelajari pengaruh parameter operasi yaitu laju alir gas,dan variasi tekanan kontaktor membran pada proses desorpsi terhadap laju perpindahan massa dan persen CO_2 *removal*.

Material membran yang digunakan adalah membran serat berongga polipropilena. Pelarut yang digunakan untuk proses absorpsi CO_2 adalah campuran dari golongan amina tersier (MDEA) dengan aktivatornya, PZ dan MSG. Pada proses absorpsi gas yang mengandung CO_2 20% (*balance* N_2) dialirkan ke bagian *shell* kontaktor membran absorpsi dan pelarut dialirkan melalui pompa ke bagian *tube.* Gas yang keluar dari bagian *shell* disebut sebagai *sales gas*. Selanjutnya pada proses desorpsi, pelarut yang kaya akan CO_2 (*rich amine*) yang keluar dari modul kontaktor membran absorpsi dialirkan dengan pompa ke bagian *tube* modul kontaktor membran desorpsi yang sebelumnya divariasikan suhu masuknya dengan cara pemanasan. Gas CO_2 dalam pelarut berdifusi melewati pori membran dan akan terpisah dari pelarut melalui bagian *shell* dengan bantuan pompa vakum. Sedangkan pelarut yang mengandung sedikit CO_2 (*lean amine*) keluar dari bagian *tube* modul kontaktor membran desorpsi.

Parameter yang diperoleh adalah laju perpindahan massa CO_2 dan % CO_2 *removal*. Konsentrasi gas CO_2 serta konsentrasi gas CO_2 di dalam pelarut dianalisa menggunakan titrasi *chittic*

dengan pelarut HCl 1 M dan *methyl orange* sebagai indikator.

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 CO_2 yang masuk ke modul membran 20% (*balance* N_2) yang diperoleh dari PT. Samator Gas. Selanjutnya untuk mempermudah pemahaman, variasi konsentrasi gas CO_2 ini disebut sebagai gas umpan. Pelarut yang digunakan untuk proses absorpsi CO_2 adalah MDEA dengan aktivatornya, MSG dan PZ.

Tabel III.1 Data Karakteristik Membran Polipropilena

Parameter	Keterangan
Diameter dalam (d_i) (mm)	0,35
Diameter luar (d_o) (mm)	0,5
Diameter pori (d_p) (μm)	0,2
Panjang fiber (cm)	30
Jumlah fiber absorpsi	6500
Jumlah fiber desorpsi	6500
Porositas	0,65

III.3 Variabel Penelitian

III.3.1 Kondisi yang Ditetapkan

Penentuan kondisi tetap diambil dari hasil penelitian sebelumnya, seperti pada penelitian hafan dkk (2017) yang menunjukkan kondisi operasi desorpsi terbaik pada suhu 70˚C.

- **Absorpsi**

1. Konsentrasi pelarut (pelarut 29%, aktivator 1%)
2. Suhu Pelarut masuk absorpsi = 32 ˚C.
3. Konstrasi CO_2 dalam gas umpan = 20% volume.
4. Laju alir Pelarut = 100 mL/min

- **Desorpsi**

1. Konsentrasi pelarut (pelarut 29%, aktivator 1%)
2. Suhu Pelarut masuk desorpsi = 70 ˚C
3. CO_2 loading = ± 0,14

III.3.2 Variabel Masukan

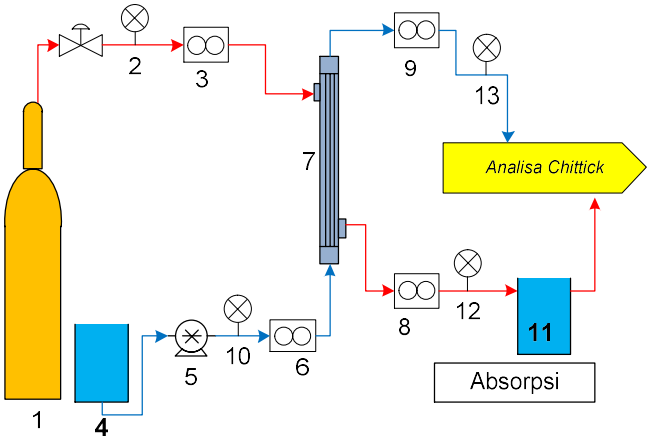
1. Laju alir gas umpan= 200,300,400,500,600 (mL/min)
2. Tekanan vacuum desorpsi = 88, 74, 61, 48, 34 kPa abs.
3. Jenis pelarut = MDEA, MDEA-MSG, MDEA-PZ

III.3.3 Variabel Respon

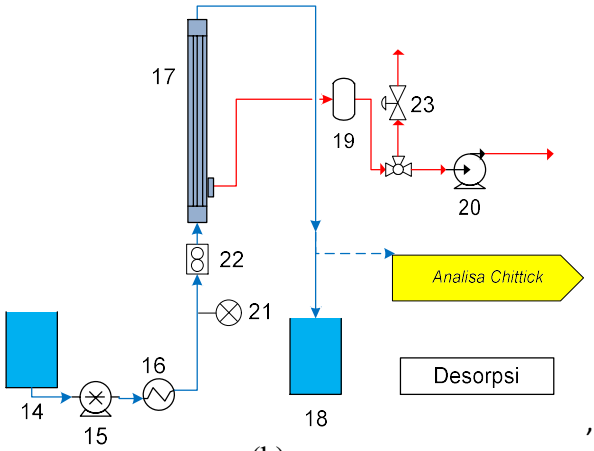
1. Fluks absorpsi dan desorpsi CO_2
2. persen CO_2 *removal* (absorpsi dan desorpsi)
3. CO_2 loading

III.4 Rangkaian Alat Penelitian

Pada penelitian ini, proses absorpsi-stripping akan dibuat sesuai dengan konsep pada **Gambar III.1.**



(a)



(b)

Keterangan

1. Tabung gas $CO_2 – N_2$
2. *Pressure gauge gas in*
3. *Flowmeter* gas $CO_2 – N_2$
4. Tangki pelarut MDEA
5. Pompa pelarut
6. *Flowmeter* pelarut
7. Modul Kontraktor Membran
8. *Flowmeter Sales Gas*
9. *Flowmeter Rich Absorbent*
10. *Pressure gauge liquid in*
11. Tempat *Bubling* Gas
12. *Pressure gauge gas out*
13. *Pressure gauge liquid out*
14. Tangki pelarut kaya akan CO_2
15. Pompa pelarut kaya akan CO_2
16. Pemanas
17. Modul Kontraktor Membran
18. Tangki penampung pelarut
19. *Briefing tube (silica gel)*
20. Pompa vakum
21. *Pressure gauge liquid*
22. *Flowmeter* pelarut
23. *Valve bypass*

Gambar III.1 Rangkaian alat kontaktor membran untuk (a) absorpsi dan (b) desorpsi CO_2

III.5 Prosedur Penelitian

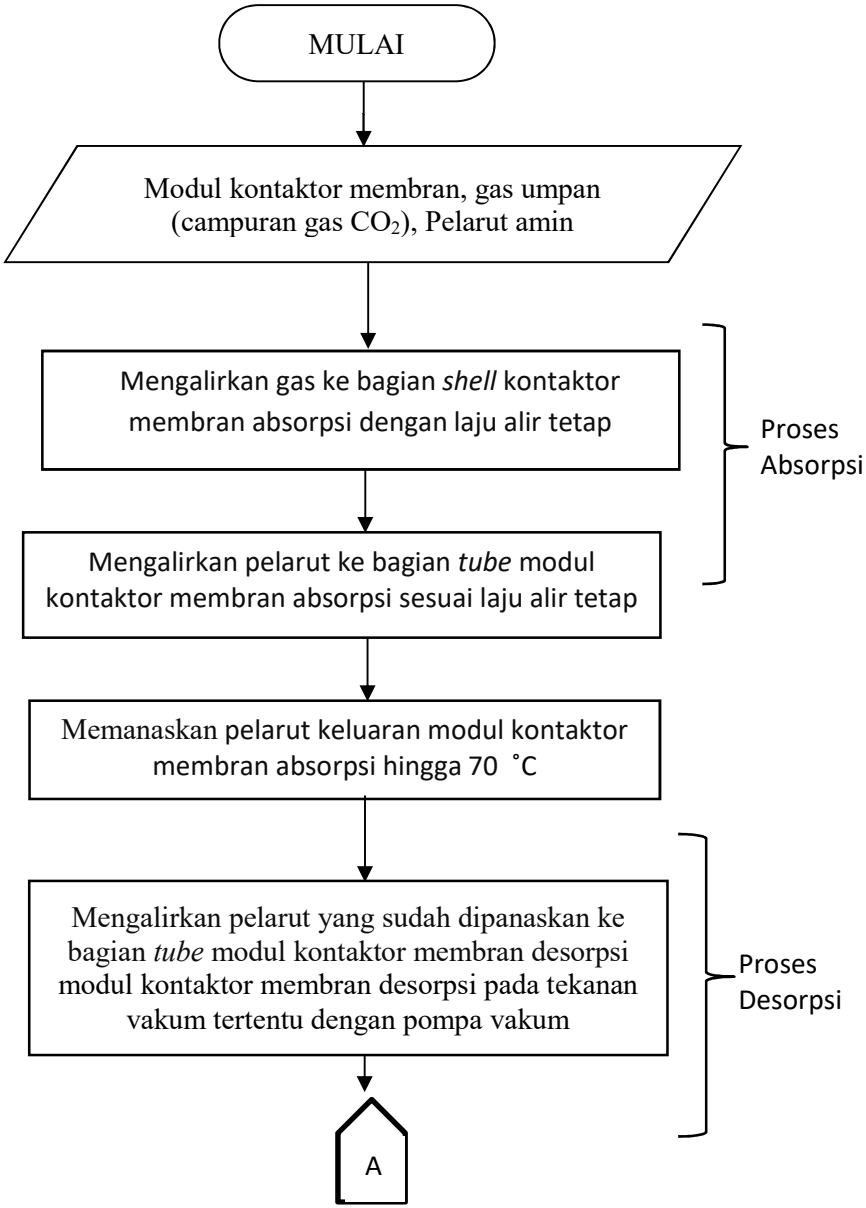
III.5.1 Proses Absorpsi CO_2

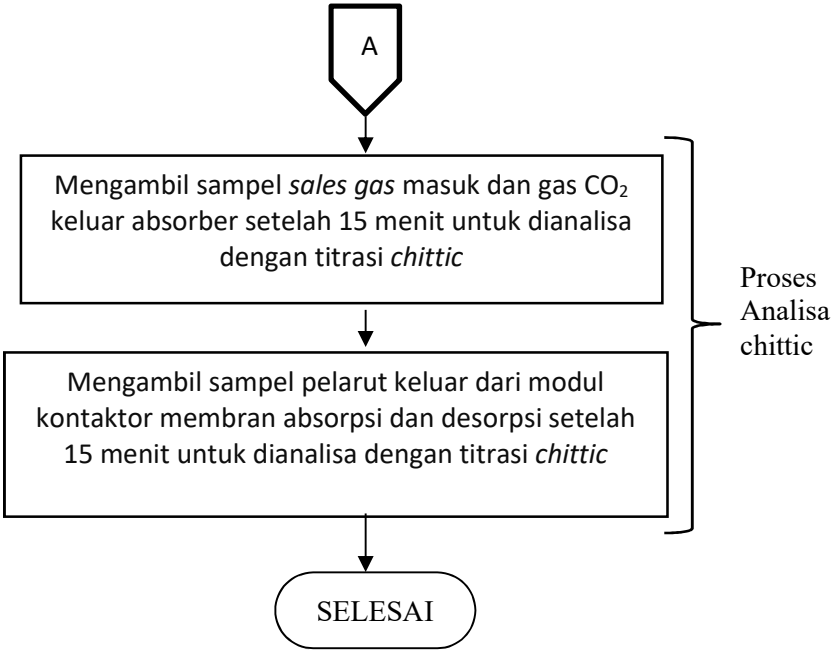
Pada proses absorpsi, mulanya gas yang mengandung CO_2 dialirkan dengan laju alir gas tertentu melalui bagian *shell* membran dimana laju alir gas diukur menggunakan *flowmeter*, sedangkan pelarut dialirkan menggunakan pompa ke bagian *tube* dengan laju alir tertentu dan mode paralel aliran *counter-current* terhadap aliran gas. Perpindahan massa gas CO_2 terjadi saat gas CO_2 dari gas umpan berdifusi ke dalam pelarut melalui permukaan membran yang disebabkan oleh adanya perbedaan konsentrasi CO_2. Gas yang keluar dari bagian *shell* membran disebut dengan *sales gas* dan dianalisa menggunakan titrasi *chittic*.

III.5.2 Proses Desorpsi CO_2

Pada proses desorpsi, pelarut yang kaya akan gas CO_2 (*rich amine*) keluaran dari modul kontaktor membran absorpsi dialirkan menggunakan pompa masuk ke dalam bagian *tube* kontaktor membran desorpsi yang sebelumnya dipanaskan hingga 70°C. Pemanasan ini bertujuan untuk menurunkan kelarutan CO_2 di dalam pelarut sehingga CO_2 dapat mudah lepas dari pelarut. CO_2 dalam pelarut terpisah dari pelarut dan berdifusi keluar melewati pori membran melalui bagian *shell* dengan bantuan pompa vakum dengan variasi tekanan vakum operasi. Pelarut yang mengandung sedikit CO_2 (*lean amine*) keluar melalui bagian *tube* kontaktor membran desorpsi untuk digunakan kembali sebagai pelarut dalam proses absorpsi. Konsentrasi CO_2 dalam pelarut dianalisa menggunakan titrasi *chittic* dengan HCl 1 M.

Langkah – langkah percobaan dijelaskan dalam diagram alir pada gambar III.2.


MULAI
Modul kontaktor membran, gas umpan (campuran gas CO_2), Pelarut amin
Mengalirkan gas ke bagian *shell* kontaktor membran absorpsi dengan laju alir tetap
Mengalirkan pelarut ke bagian *tube* modul kontaktor membran absorpsi sesuai laju alir tetap
Proses Absorpsi
Memanaskan pelarut keluaran modul kontaktor membran absorpsi hingga 70 ˚C
Mengalirkan pelarut yang sudah dipanaskan ke bagian *tube* modul kontaktor membran desorpsi modul kontaktor membran desorpsi pada tekanan vakum tertentu dengan pompa vakum
Proses Desorpsi
A



Gambar III.2 Diagram Alir Penelitian

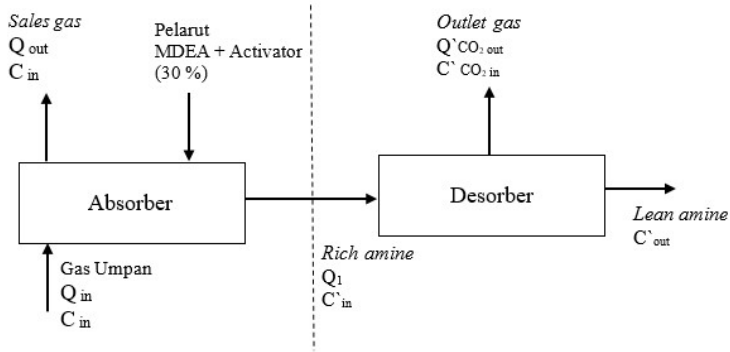
III.6 Prosedur Analisa Hasil Penelitian

Analisa hasil pada percobaan ini adalah analisa konsentrasi gas CO_2 di dalam gas dan pelarut. CO_2 yang terkandung dalam sampel *sales gas* dan gas CO_2 keluar desorpsi dianalisa menggunakan titrasi *chittic*. Kandungan CO_2 dalam *sales gas* dan gas CO_2 keluar desorpsi digunakan untuk menentukan laju perpindahan massa CO_2 (fluks). Sedangkan konsentrasi CO_2 yang terkandung dalam pelarut dianalisa menggunakan titrasi *chittic.*

III.6.1 Analisa Konsentrasi Gas CO_2 Masuk dan Keluar Modul Membran

Konsentrasi gas CO_2 dari hasil analisa digunakan untuk menghitung fluks atau laju perpindahan massa CO_2

(J_{CO2}) dan menghitung persen CO_2 *removal* pemisahan CO_2 (η) dengan menggunakan persamaan yang digunakan oleh (Rahim, dkk. 2015).



Gambar III.3 Skema neraca massa CO_2 untuk proses absorpsi dan desorpsi

Persamaan fluks absorpsi :

$$J_{CO_2} = \frac{Q_{im}\ x\ C_{in} - Q_{out}\ x\ C_{out}}{A} \quad \text{.....(III.1)}$$

dimana J_{CO2} adalah fluks absorpsi dalam (mol/m^{2}s), Q_{in} dan Q_{out} adalah laju alir gas CO_2 masuk dan laju alir gas CO_2 keluar (m^3/s), C_{in} dan C_{out} adalah konsentrasi *inlet* dan *outlet* dari gas CO_2 (mol/m^3). Sedangkan untuk fluks desorpsi :

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

J'_{CO2} adalah fluks desorpsi dalam (mol/m^{2}s), C'_{in} dan C'_{out} adalah konsentrasi CO_2 *inlet* dan *outlet* dalam fase liquid (mol/m^3), dan Q_l adalah laju alir pelarut (m^3/s).

Persamaan persen CO_2 *removal* absorpsi:

$$\eta = \frac{Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}}{Q_{in}\ x\ C_{in}} x100\% \text{ .....(III.3)}$$

Persamaan persen CO_2 *removal* desorpsi:

$$\eta = \frac{C'_{in} - C'_{out}}{C^{l}_{in}} x100\% \text{ .....(III.4)}$$

III.6.2 Analisa Konsentrasi Gas CO_2 dalam Pelarut Keluar Modul Membran

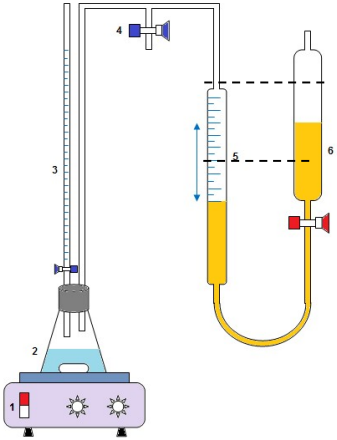
Konsentrasi CO_2 di dalam pelarut ditentukan dengan analisa titrasi *chittic*, skema alat ditunjukkan oleh Gambar III.3. Labu erlenmeyer (2) berisi sampel pelarut dengan indikator (*methyl orange*) dihubungkan dengan dua saluran dan ditempatkan dalam pengaduk magnetik (1). Sambungan pertama dihubungkan 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. CO_2 yang terlepas dari sampel ditangkap oleh larutan garam NaCl jenuh yang ada di *levelling bulb* (6) melalui U-*tube*. Jumlah CO_2 yang terlepas tersebut dapat diketahui berapa jumlahnya dari perubahan volume yang ditunjukkan oleh *measuring burette* (5).

Konsentrasi CO_2 di dalam pelarut, biasa disebut dengan CO_2 *loading,* ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\alpha = \frac{mol(CO_2)}{mol(pelarut)} = \left[\frac{\frac{(V_{gas} - V_{HCl})(P)(273K)}{(101325Pa)(T)(22{,}4L/mol)}}{C_1 V_1} \right] \text{ .....(III.6)}$$

(Rahim, dkk. 2015)

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 atmosfer (Pa), T adalah suhu ruangan (K), C_1 adalah konsentrasi pelarut (mol/L), dan V_1 adalah volume sampel pelarut (mL).



Keterangan :

1. Pengaduk Magnetik
2. Labu Erlenmeyer
3. Buret
4. *Venting valve*
5. *Measuring burette*
6. Levelling bulb

Gambar III.4 Skema alat titrasi *chittic*

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

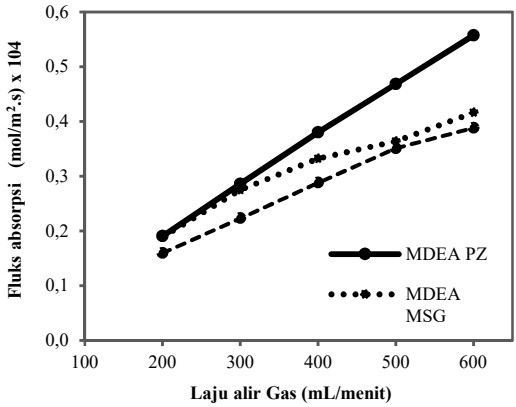
Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh variasi aktivator pada proses absorpsi dan desorpsi CO_2 menggunakan kontaktor membran, mempelajari pengaruh parameter operasi yaitu laju alir gas umpan pada proses absorpsi dan tekanan vakum pada proses desorpsi terhadap laju perpindahan massa (fluks), dan kinerja membrane serat berongga pada modul dan sistem kontinyu menggunakan pelarut *MethylDiethanolamine* (MDEA) terhadap fluks dan %CO_2 *removal* absorbsi-desorpsi. Parameter operasi dan pelarut yang terbaik akan dipilih berdasarkan fluks dan %CO_2 *removal* terbaik. Prinsip dari proses absorpsi maupun desorpsi dalam penelitian ini adalah adanya perbedaan konsentrasi, sehingga mendorong difusi gas CO_2 dari konsentrasi yang tinggi ke konsentrasi yang rendah. Respon yang diukur untuk kedua tujuan penelitian ini adalah fluks absorpsi dan desorpsi CO_2, %CO_2 *removal* serta CO_2 *loading*.

Material membran yang digunakan adalah membran serat berongga polipropilena. Pelarut yang digunakan untuk proses absorpsi CO_2 adalah senyawa golongan amina sekunder yaitu *Methyl Diethanolamine* (MDEA) dan campuran MDEA dengan aktivator yaitu *piperazine,* dan *monosodium glutamat*. Pada proses absorpsi gas yang mengandung 20% volume CO_2 (*balance* N_2) 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 hingga 200 ml/menit. Gas yang keluar dari bagian *shell* disebut sebagai *sales gas*. Sedangkan pelarut yang keluar dari kontaktor membran yang kaya akan CO_2 (*rich amine*) ditampung untuk proses desorpsi. Pada proses desorpsi *rich amine* dengan suhu 70°C dialirkan dengan pompa ke bagian *tube* modul kontaktor membran desorpsi dengan tekanan bervariasi antara 88,

74, 61, 48, 34 kPa abs . Gas CO_2 dalam pelarut berdifusi melewati pori membran dan akan terpisah dari pelarut melalui bagian *shell* dengan bantuan pompa vakum. Sedangkan pelarut yang mengandung sedikit CO_2 (*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 konstan (*steady state*). Untuk setiap variabel dilakukan pengambilan sampel *sales gas*, *rich amine,* dan *lean amine*. Sampel kemudian dianalisa menggunakan titrasi *chitick* untuk mengetahui konsentrasi CO_2 pada sampel.

IV.1 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap Laju Perpindahan Massa CO_2 (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 fluks CO_2 Hasil percobaan menunjukkan pengaruh laju alir gas umpan terhadap fluks CO_2 disajikan dalam **Gambar IV.1**.

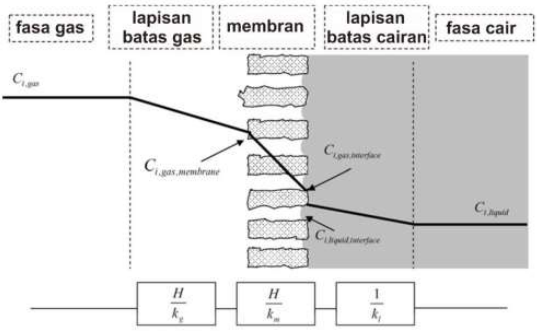


Gambar IV.1 Pengaruh laju alir gas umpan terhadap fluks absorpsi CO_2 pada berbagai jenis pelarut (CO_2 : 20% vol ; $Q_{pelarut}$ = 100 ml/menit)

Gambar IV.1 menunjukkan semakin besar laju alir gas umpan maka fluks absorpsi CO_2 akan semakin meningkat pada ketiga jenis pelarut (MDEA, MDEA-MSG, dan MDEA-PZ). Hal ini disebabkan dengan semakin meningkatnya laju alir gas maka ketebalan lapisan film gas juga akan semakin menipis sehingga hambatan perpindahan CO_2 menurun yang akan memudahkan CO_2 berdifusi dari fasa gas ke fasa *liquid*. Laju alir gas CO_2 yang semakin tinggi menyebabkan distribusi gas CO_2 ke pori membran semakin besar sehingga jumlah gas CO_2 yang berdifusi ke dalam pelarut semakin banyak. (Lv. Dkk 2012)

Dari hasil percobaan menunjukkan fluks absorpsi CO_2 untuk masing masing pelarut pada laju alir gas 600 ml/min yaitu, MDEA = 0,38 x 10^{-4} mol/m^2.s , MDEA-MSG = 0,41 x 10^{-4} mol/m^2.s, dan MDEA-PZ = 0,55 x 10^{-4} mol/m^2.s. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa nilai fluks tertinggi dimiliki oleh MDEA-PZ.

Proses difusi CO_2 ke dalam pelarut tersebut terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi antasa fasa gas dan fasa *liquid* dimana gas umpan yang memiliki konsentrasi CO_2 lebih tinggi akan berdifusi melalui pori membran ke dalam pelarut. Profil konsentrasi gas CO_2 pada saat terjadinya absorpsi diilustrasikan pada **Gambar IV.2**.



Gambar IV.2 Profil konsentrasi gas CO_2 pada perpindahan massa gas CO_2 dari fasa gas ke fasa liquid (Zhang dkk, 2008)

Berdasarkan **Gambar IV.1** fluks CO_2 MDEA teraktivasi lebih tinggi dibandingkan larutan MDEA yang tidak teraktivasi. Hal ini disebabkan dengan adanya aktivator yang dapat mempercepat reaksi pembentukan karbamat secara spontan, dimana ketika tanpa adanya aktivator maka reaksi akan berjalan lebih lambat. Reaksi kimia yang terjadi antara CO_2 dengan MDEA akan menghasilkan karbamat dan MDEA terprotonasi.

$CO_2 + MDEA + H_2O \leftrightarrow MDEAH^+ + HCO_3^-$ ..... (4.1)

Dalam persamaan (4.1) dapat dilihat proses pembentukan karbamat terjadi dalam dua tahapan menurut Camacho dkk. (2008) yaitu :

$H_2O + MDEA \leftrightarrow MDEAH^+$ (instan).....(4.2)

$OH^- + CO_2 \leftrightarrow HCO_3^-$ (lambat) .....(4.3)

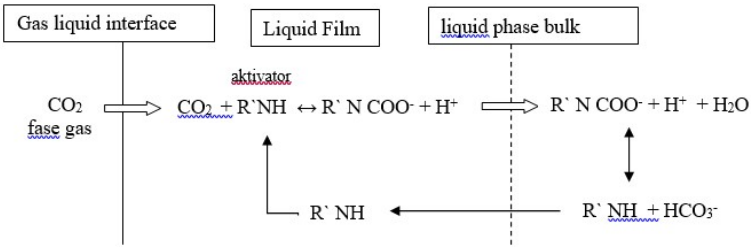
Dimana untuk mekanisme secara keseluruhan juga akan melibatkan reaksi dari pembentukan asam karbonik dan ion bikarbonat dimana reaksi ini akan berjalan sangat lambat :

$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3$ ..... (4.4)

$OH^- + CO_2 \leftrightarrow HCO_3^-$.....(4.5)

Dengan adanya penambahan aktivator yang memiliki reaktivitas kimia yang tinggi, pada saat gas CO_2 melewati lapisan batas antara fasa gas dan cairan akan bertemu dengan MDEA dan H_2O beserta aktivator (PZ atau MSG) dalam jumlah kecil. Dikarenakan gas CO_2 yang tidak dapat bereaksi langsung dengan MDEA dan H_2O, sebagian besar gas CO_2 hanya akan bereaksi dengan aktivator. Produk dari reaksi tersebut (karbamat atau zwitterion) akan berdifusi menuju fasa *bulk* cairan. (Lu, dkk. 2007). Selanjutnya melalui proses hidrolitik karbamat akan mengubah CO_2-nya menjadi bikarbonat. Sementara itu, PZ tersebut akan teregenerasi ke bentuk semula. Mekanisme tersebut dijelaskan pada persamaan (4.6) dan (4.6) serta **Gambar IV.3**.

$HN(C_4H_8)NH + CO_2 \leftrightarrow HNC_4H_8NCOO^- + H^+$ ……(4.6)
$HN(C_4H_8)NCOO^- + H_2O \leftrightarrow HCO_3^- + HN(C_4H_8)NH$ …….. (4.7)



Gambar IV.3. Mekanisme aktivasi dari aktivator pada pelarut MDEA-PZ

Penambahan aktivator MSG yang merupakan garam-asam amino, dimana secara umum garam asam amino yang digunakan secara struktural mempunyai kemampuan yang sama dengan senyawa alkanolamine dalam menyerap CO_2. Asam amino yang dilarutkan dalam air merupakan spesies *amphiprotic* yang sekurangnya memiliki satu gugus hidroksil atau sulphonil dan satu buah gugus amina. Asam amino yang terlarut dalam air membentuk zwitterion seperti pada persamaan (4.8).

$HOOC\text{-}CHR\text{-}NH_3^- \leftrightarrow {}^-OOC\text{-}CHR\text{-}NH_3\text{-} \leftrightarrow {}^-OOC\text{-}CHR\text{-}NH_2$ ……(4.8)
Asam amino Zwitter ion

Menurut Thee (2013), dengan penambahan basa kuat seperti Potassium hidroksida ataupun Sodium hidroksida pada zwitterion akan membuat asam anion bermuatan negatif yang akan membentuk asam amino aktif yang memiliki sebuah gugus amina ($-NH_2$) dimana struktur ini memiliki struktur geometri yang sama dengan gugus aktif *alkanolamine*. Reaksi penambahan basa kuat pada asam amino ditunjukkan pada persamaan (4.9).

$OH^- + {}^-OOC\text{-}CHR\text{-}NH_3^+ \rightarrow {}^-OOC\text{-}CHR\text{-}NH_2 + H_2O$…….(4.9)

Proses absorpsi CO2 menggunakan garam asam amino mengikuti tipikal reaksi dari amina primer dan sekunder, dimana

pada reaksi tersebut akan membentuk karbamat dan bikarbonat. Berikut reaksi dari garam asam amino :

$CO_2 + {}^{-}COO\text{-}CHR\text{-}NH_2 + OH^- \leftrightarrow {}^{-}COO\text{-}NH_2\text{-}CHR\text{-}COO^- + H_2O$ (instan) ……(4.10)

$CO_2 + OH^- \leftrightarrow HCO_3^-$ (lambat) ……(4.11)

Ion-ion hidroksil yang digunakan pada persamaan (4.10) dan (4.11) merupakan hasil produk dari garam asam amino basa lemah pada larutan encer.

$OOC\text{-}CHR\text{-}NH_2 + H_2O \leftrightarrow OH^- + {}^{-}OOC\text{-}CHR\text{-}NH_3^+$ …...(4.12)

Reaksi (4.13) juga perlu dipertimbangkan, dimana reaksi ini disebut dengan pembentukan basa katalis bikarbonat sesuai menurut Donaldsen dan Nguyen, dimana saat memproduksi ion hidroksil pada persamaan (4.12), kemudian ia juga akan bereaksi dengan CO_2 seperti pada persamaan (4.11).

$CO_2 + {}^{-}OOC\text{-}CHR\text{-}NH_2 + H_2O \leftrightarrow {}^{-}OOC\text{-}CHR\text{-}NH_3^+ + HCO_3^-$ (lambat)……..(4.13)

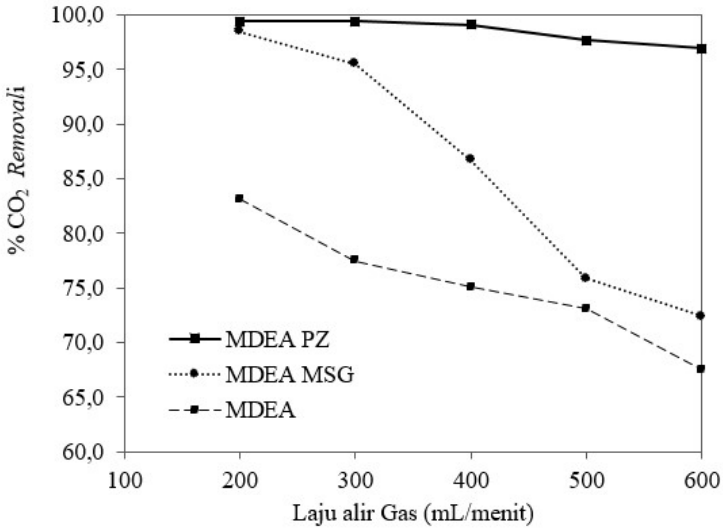
Setelah terbentuk, karbamat kemudian dapat mengalami hidrolisis untuk menghasilkan bikarbonat dan amine bebas. Amine yang telah bebas dapat bereaksi kembali dengan molekul CO_2 lainnya, sehingga dengan adanya hidrolisis dapat meningkatkan absorpsi CO_2. Mekanisme tersebut dijelaskan pada persamaan (4.14)

${}^{-}COO\text{-}NH_2\text{-}CHR\text{-}COO^- + H_2O \leftrightarrow COO\text{-}NH_2\text{-}CHR + HCO_3^-$ ...(4.14)

Dari reaksi diatas secara teoritis adanya aktivator berjenis garam asam amino pada pelarut amina yang ditambahkan dengan asam kuat dapat menjadi salah satu aktivator karena kemampuannya dalam mengabsorpsi CO_2. Hal ini sesuai dengan hasil percobaan pada **Gambar IV.1**.

IV.2 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap % CO_2 *Removal*

Pengaruh laju alir gas umpan terhadap %CO_2 *removal* ditunjukkan oleh **Gambar IV.4** pada konsentrasi gas umpan 20% CO_2, dimana gafik menunjukkan kecenderungan garis yang menurun seiring bertambahnya laju alir gas umpan.



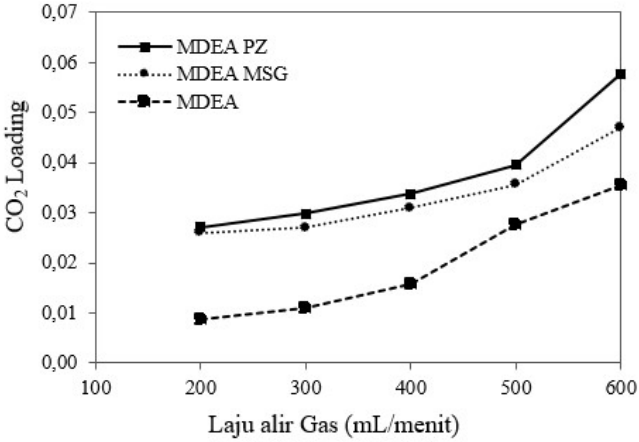
Gambar IV.4 Pengaruh laju alir gas umpan terhadap % CO_2 *removal* pada berbagai jenis pelarut (CO_2 20% volume ; $Q_{pelarut}$ = 100 ml/menit)

Dari **Gambar IV.4** menunjukkan bahwa dengan adanya kenaikan laju alir gas dapat menyebabkan %CO_2 *removal* semakin menurun. Fenomena ini disebabkan oleh waktu tinggal dari gas umpan yang semakin singkat. Ketika waktu tinggal dari gas umpan pada kontaktor membran semakin singkat, maka waktu kontak antar gas dan pelarut juga semakin singkat, sehingga akan menurunkan laju difusi CO_2 dalam proses absorpsi. Hal ini akan berpengaruh terhadap %CO_2 *removal* yang juga semakin turun (Lv, dkk. 2012).

Dari **Gambar IV.1** dan **Gambar IV.4** menunjukkan ketidaksamaan fenomena dimana dengan adanya kenaikan laju alir gas fluks CO_2 absorpsi semakin meningkat sementara pada % CO_2 *removal* menunjukkan fenomena yang sebaliknya. Hal ini disebabkan karena tingkat perpindahan massa CO_2 yang tidak begitu besar. Fenoma keseragaman fluks CO_2 absorpsi dan % CO_2 *removal* dapat terjadi jika fluks CO_2 bernilai sangat tinggi ditunjukkan dengan grafik yang meningkat dengan tajam.

Dari hasil percobaan menunjukkan % CO_2 *removal* untuk masing masing pelarut pada laju alir gas 600 ml/min dan laju alir pelarut 100ml/min yaitu, MDEA = 67%, MDEA-MSG = 72%, dan MDEA-PZ = 96%. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa % CO_2 *removal* tertinggi dimiliki oleh MDEA-PZ . Hasil percobaan ini sesuai dengan penelitian Lv, dkk. (2012) yang menjelaskan bahwa kenaikan laju alir gas umpan memberikan pengaruh yang berbanding terbalik dengan %CO_2 *removal*.

IV.3 Pengaruh Laju Alir Gas Umpan terhadap CO_2 *loading*



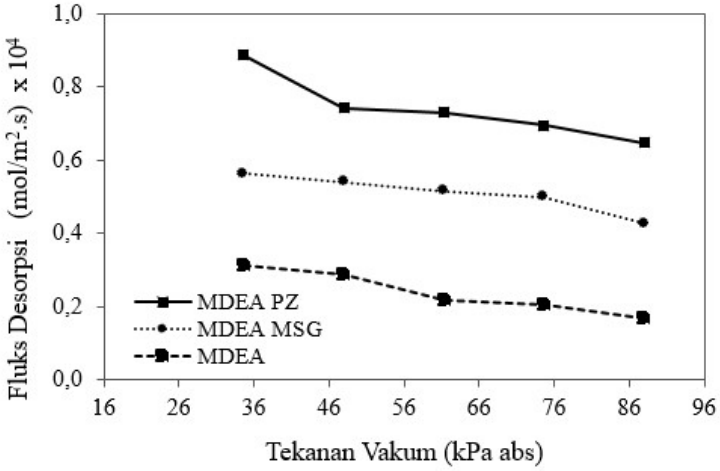
Gambar IV.5 Pengaruh laju alir gas umpan terhadap CO_2 *loading* pada berbagai jenis pelarut (CO_2 20% volume ; $Q_{pelarut}$ = 100 ml/menit)

Gambar IV.5 menunjukkan bahwa semakin tinggi laju alir gas umpan menyebabkan CO_2 *loading* semakin besar. Besarnya CO_2 *loading* dipengaruhi oleh besarnya fluks absorpsi CO_2, semakin besar fluks CO_2 dari permukaan membran ke dalam pelarut (fluks absorpsi) menunjukkan banyaknya CO_2 yang terserap ke dalam pelarut.

Dari **Gambar IV.1** dan **Gambar IV.5** menunjukkan ketidaksamaan fenomena dimana dengan adanya kenaikan laju alir gas fluks CO_2 absorpsi menghasilkan grafik yang hampir stabil konstan naik, sementara pada CO_2 *loading* menghasilkan grafik peningkatan yang tidak stabil. Hal ini disebabkan karena adanya gas yang tidak terikat pada pelarut yang mengalir pada aliran pelarut.

Hasil penelitian menunjukkan pada konsentrasi gas umpan 20% CO_2 nilai CO_2 *loading* pada masing masing pelarut yaitu, MDEA = 0,036 mol CO_2 /mol pelarut ; MDEA-MSG= 0,047 mol CO_2 /mol pelarut; dan MDEA-PZ yang mencapai 0,058 mol CO_2/mol pelarut. Nilai CO_2 *loading* dalam penelitian ini sesuai dengan penelitian Haji-Sulaiman dkk (1998), yang menyebutkan kisaran CO_2 *loading* pada larutan MDEA berada pada nilai maksimum 0,01 - 0,88 mol CO_2/mol MDEA.

IV.4 Pengaruh Operasi Tekanan Vakum terhadap Fluks Desorpsi

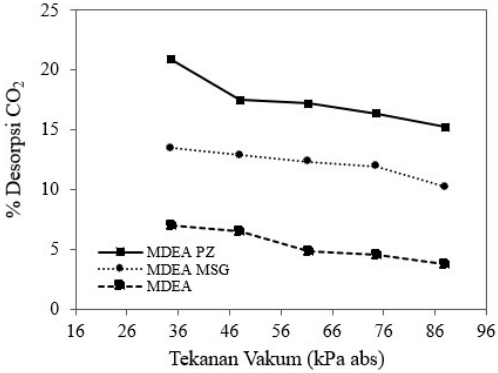


Gambar IV.6 Pengaruh operasi tekanan vakum terhadap fluks desorpsi pada berbagai jenis pelarut (CO_2 Loading = ± 0,14 ; $Q_{pelarut}$ = 100 ml/menit)

Pada **Gambar IV.6** menunjukkan kecenderungan bahwa semakin rendah operasi tekanan vakum, maka nilai fluks dan %CO_2 *removal* semakin tinggi. Hal ini dikarenakan dengan menurunnya tekanan dapat mengurangi tekanan parsial CO_2 dalam fase gas, sehingga dapat meningkatkan *driving force* regenerasi perpindahan massa. Di sisi lain, dengan adanya penurunan tekanan total juga dapat menyebabkan peningkatan tambahan laju aliran uap, seperti pada penelitian (Fang dkk, 2009). Ketika air pada suhu 338 K, tekanan uap air sekitar 25 kPa. Dimana ketika tekanan regenerasi kurang dari 25 kPa, air tersebut akan menguap dan akan terbentuk uap air dalam jumlah yang banyak yang selanjutnya akan bertindak sebagai sweep gas untuk menyapu (*sweeping*) permukaan liquid, yang kemudian menghasilkan penurunan tekanan parsial yang tinggi pada CO_2, sehingga akan meningkatkan %CO_2 *removal* desorpsi.

Dari hasil percobaan menunjukkan fluks desorpsi CO_2 untuk masing masing pelarut pada tekanan vakum 34 kpa yaitu, MDEA = 0,311 x 10^{-4} mol/m^2.s , MDEA-MSG = 0,56 x 10^{-4} mol/m^2.s, dan MDEA-PZ = 0,88 x 10^{-4} mol/m^2.s. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa nilai fluks desorpsi tertinggi dimiliki oleh MDEA-PZ .Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Ahn dkk. (2013) yang menunjukkan dengan adanya penurunan tekanan vakum dapat meningkatkan fluks desorpsi.

IV.5 Pengaruh Operasi Tekanan Pompa Vakum terhadap %Desorpsi CO_2

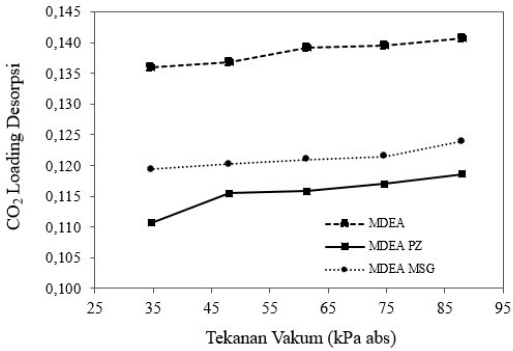


Gambar IV.7 Pengaruh operasi tekanan vakum terhadap %Desorpsi CO_2 pada berbagai jenis pelarut (CO_2 Loading = ± 0,14 ; $Q_{pelarut}$ = 100 ml/menit)

Dari **Gambar IV.7** terlihat bahwa dengan adanya penurunan tekanan vakum desorpsi dapat meningkatkan %Desorpsi CO_2. Pada subbab IV.4. telah dijelaskan bahwa penurunan tekanan vakum menyebabkan nilai fluks desorpsi semakin meningkat. Fluks desorpsi CO_2 yang meningkat menyebabkan gas CO_2 semakin cepat berdifusi melalui pori membran ke sisi fasa gas dan menyebabkan jumlah CO_2 yang berhasil terlepas dari pelarut dan terikut dalam aliran vakum

semakin besar yang berarti juga akan meningkatkan %Desorpsi CO_2. Dari hasil percobaan menunjukkan %Desorpsi CO_2 untuk masing masing pelarut pada tekanan vakum 34 kPa yaitu, MDEA = 7,3 %, MDEA-MSG = 13,47%, dan MDEA-PZ = 20,9%. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa %Desorpsi CO_2 tertinggi dimiliki oleh MDEA-PZ.

IV.6 Pengaruh Operasi Tekanan Pompa Vakum terhadap CO_2 *loading*



Gambar IV.8 Pengaruh operasi tekanan vakum terhadap CO_2 Loading pada berbagai jenis pelarut (CO_2 Loading = ± 0,14 ; $Q_{pelarut}$ = 100 ml/menit)

Pada **Gambar IV.8** menunjukkan pola yang sergam, dimana dengan adanya penurunan tekanan vakum menunjukkan penurunan CO_2 loading. Hal ini menunjukkan bahwa dengan adanya penurunan tekanan vakum jumlah CO_2 yang terlepas dari pelarut semakin besar. Pada subbab IV.4**.** telah dijelaskan bahwa penurunan tekanan vakum menyebabkan nilai fluks desorpsi semakin meningkat. Fluks desorpsi CO_2 yang meningkat menyebabkan gas CO_2 semakin cepat berdifusi melalui pori membran ke sisi fasa gas dan menyebabkan jumlah CO_2 yang berhasil terlepas dari pelarut dan terikut dalam aliran vakum semakin besar.

Dari hasil percobaan menunjukkan CO_2 *loading* untuk masing masing pelarut pada tekanan vakum 34 kPa setelah dilakukan regenerasi yaitu untuk MDEA = 0,135 mol CO_2/pelarut , MDEA-MSG = 0,119 mol CO_2/pelarut, dan MDEA-PZ = 0,111 mol CO_2/pelarut. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa nilai CO_2 *loading* terendah dimiliki oleh MDEA-PZ. Nilai CO_2 loading yang lebih kecil dari jenis pelarut lain (MDEA, MDEA-MSG) ini disebabkan karena struktur molekul PZ yang sangat reaktif sehingga sangat memudahkan pengikatan maupun pelepasan CO_2.

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

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 CO_2 adalah pelarut MDEA teraktivasi. Dimana untuk proses absorpsi CO_2, pelarut yang terbaik adalah pelarut MDEA-PZ dengan perbandingan %CO_2 *Removal* 1,4 kali lebih tinggi dibandingkan pelarut MDEA tidak teraktivasi. Sedangkan untuk proses desorpsi CO_2, dengan pelarut MDEA-PZ %desorpsi CO_2 2,9 kali lebih tinggi dibandingkan dengan pelarut MDEA tidak teraktivasi.
2. Pengaruh parameter operasi terhadap fluks dan persen CO_2 *Removal*

a) Kenaikan laju alir gas umpan dapat meningkatkan fluks absorpsi akan tetapi hal tersebut juga akan menurunkan %CO_2 *Removal*.
   - Fluks absorpsi tertinggi diperoleh sebesar 0,55 x 10^{-4} mol/m^2.detik dengan pelarut MDEA-PZ serta kondisi operasi Q_g = 600 ml/menit dan Q_L = 100 ml/menit
   - Efisiensi pemisahan absorpsi CO_2 tertinggi sebesar 99,4% dengan pelarut MDEA-PZ serta kondisi operasi Q_g = 200 ml/menit dan Q_L = 100 ml/menit.

b) Pengaruh parameter operasi tekanan operasi vakum terhadap fluks desorpsi dan efisiensi pemisahan desorpsi CO_2

c) Penurunan tekanan vakum desorpsi dapat meningkatkan fluks desorpsi serta %desorpsi CO_2
   - Fluks desorpsi tertinggi diperoleh sebesar 0,88 x10^{-4}mol/m^2.detik dengan pelarut MDEA-PZ serta kondisi operasi T_{rich}= 70 ºC, Q_L = 100 ml/menit dan P_{vakum} = 34 kPa.

- %Desorpsi CO_2tertinggi sebesar 20 % dengan pelarut MDEA-PZ serta kondisi operasi T_{rich}= 70 ºC, Q_L = 100 ml/menit dan P_{vakum} = 34 kPa.

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. Sehingga untuk penelitian selanjutnya proses desorpsi dapat dilakukan pada tekanan yang lebih vakum sehingga diperoleh hasil yang lebih baik. Penggunaan *sweeping gas* untuk menambah gaya pendorong (*driving force*) perpindahan massa CO_2 juga dapat digunakan sehingga dapat dijadikan sebagai pembanding dari hasil sebelumnya.
2. Pada penelitian tersebut dengan menggunakan aktivator MSG pada pelarut dapat meningkatkan absorpsi CO_2 dibandingkan dengan pelarut tanpa adanya aktivator. Akan tetapi hasil absorpsi dari aktivator MSG pada konsentrasi 1 % pelarut, masih belum memperoleh hasil yang memuaskan. Sehingga pada penelitian selanjutnya dapat digunakan variabel konsentrasi aktivator MSG untuk diperoleh hasil yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

Ahn, H., Kim. J., Hoon. J.K. 2013. *Low-temperature vacuum stripping of CO_2 from aqueous amine solutions using thin-film silicalite-filled PDMS composite membranes*. International Journal of Greenhouse Gas Control. 18, 165-172

Camacho F., Sanchez S., Pacheco R., Dolores M. L., Sanchez A. 2008. *Kinetics of the reaction of pure CO_2 with N-Methyldietahnolamine in Aqueous Solutions*. International Journal of Chemical Kinetics. 41, 204-214

de Montigny, D., Tontiwachwuthikul, P., Chakma, A. 2006. *Using Polypropylene and Polytetrafluoroethylene Membranes in a Membrane Contactor for CO_2 Absorption*. Journal of Membrane Science, 277, 99-107.

Dindore, V.Y., dkk. 2004. *Membrane-solvent Selection for CO_2 Removal Using Membrane Gas-liquid Contactors*, Separation and Purification Technology, 40, 133-145.

Donaldsen T.L., dan Nguyen Y. N. 1980. *Carbon dioxide reaction kinetics and transport in aqueous amine membranes.* Ind. Eng. Chem. Fundm. 19, 260-266

Fang, M., dkk. 2009. *CO_2 Chemical Absorption by Using Membrane Vacuum Regeneration Technology*, Energy Procedia, 1, 815-822.

Feron, P.H.M dan Jansen, A.E. 2002. *CO_2 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.

Hafan R. 2017. *Kontaktor Membran Polipropilena untuk Proses Absorpsi-Desorpsi CO_2 Menggunakan Variasi Pelarut Amin Teraktivasi.* Tugas Akhir. Tidak diterbitkan. Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember : Surabaya

Hedayat, dkk. 2011. *Simultaneous Separation of H_2S and CO_2 from Natural Gas by Hollow Fiber Membrane Contactor Using Mixture of Alkanolamines*. Journal of Membrane Science, 377, 191-197.

Intan, N. dan Widyawati. 2016. *Penggunaan Kontaktor Membran Menyilang Ganda untuk Pemisahan Gas CO_2 dengan Aliran Pelarut Dietanolamina (DEA) Secara Kontinyu*. Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, ITS Surabaya.

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, dkk. 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, dkk. 2011. *CO_2 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 Absorbtion-Stripping Using Novel*

Solvents and Membrane. Ind. Eng. Chem. Res, 44, 1250-1258

Kreulen, H., dkk. 1993. *Determination of Mass Transfer Rates in Wetted and Non Wetted Microporous Membranes*. Chemical Engineering Science, 48, 2093-2102.

Kumar, P.S., dkk. 2002. *New Absorption Liquids for The Removal of CO_2 from Dilute Gas Streams Using Membrane Contactors*. Chemical Engineering Science, 57, 1639-1651.

Lu J., Zheng Y., Cheng M., dan Wang., 2007. *Effects of activators on mass-transfer enhancement in a hollow fiber contactor using activated alkanolamine solutions.* Journal of Membrane Science. 289. 138-149

Lv, Yuexia., dkk. 2012. *Experimental Studies on Simultaneous Removal of CO_2 and SO_2 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.

Marzouk S., Al-Marzouqi M., El-Naas M., Abdullatif N., Ismail Z., 2010. *Removal of carbon dioxide from pressurized CO_2-CH_4 gas mixture using hollow fiber membrane contactors.* Journal of Membrane Science 351. 21-27.

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

Ningsih E., Sato E., Nafiudin M., dan Putranto W., 2017. *Absorpsi Gas CO_2 Berpromotor MSG dalam larutan K_2CO_3.* Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Industri 2017. D7.1-D7.6

Perry, R.H., dan Green, D. W. 2008 *Perryis Chemical Engineer's Handbook.* Amerika.

Rahim. N.A, Ghasem, N., Al-Marzouqi, M. 2015. *Absorption of CO_2 from Natural Gas Using Different Amino Acid salt Solutions and Regeneration Using Hollow Fiber Memebran Contactors*. UAE University, 108-117.

Rahmawati, Y. Setiani, dan Syafira. 2014. *Pengaruh Modifikasi Permukaan Membran Polipropilen untuk Proses Pemisahan CO_2*. Jurusan Teknik Kimia: Surabaya.

Rahmawati. Y., Nukhamidah, S., Susianto, Intan N. L., dan Putricahyani W., 2017. *Application of dual membrane contactor for simultaneous CO_2 removal using continues diethanolamine (DEA)*. AIP Proceedings, Vol 1840, issue 1

Rajabzadeh S., Yoshimoto S., Teramoto M., Al-Marzouqi M., dan Matsuyama H., .2009. *CO_2 absorption by using PVDF hollow fiber membrane contactors with various membrane structures*. Separation and Purification Technology. 69, 210-220.

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

Rob Lensen., 2004. *The Promoter effect of piperazine on the removal of carbon dioxide*.

Rostami S., Keshavarz P., dan Raeissi S., 2018. *Experimental study on the effects of an ionic liquid for CO_2 capture using hollow fiber membrane contactors*. International Journal of Greenhouse Gas Control. 69, 1-7.

Songolzadeh M., Soleiman M., Ravanchi M., dan Songolzadeh R., 2013. *Carbon Dioxide Separation from Flue Gases: A Technological Review Emphasizing Reduction in Greenhouse Gas Emissions*. The Scientific World Journal. Vol 2014. 1-27

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., dkk. 2003. *Impact of DEA Solutions With and Without CO_2 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.

Yan, S.P., dkk. 2014. *Experimental Study on the Separation of CO_2 from Flue Gas Using Hollow Fiber Membrane Contactors without Wetting*. Journal of Fuel Processing Technology, 88, 501-511.

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

Zhang W.F., Wang Q.H., Fang M.X., Luo Z.Y. and Cen K.F. 2008. *Progress of separation of CO2 from flue gas by membrane absorption*, Chemical Industry and Engineering Progress, 27, 635-639.

Zhu B.K., Chen W., Wang J.L., Xu Y.Y. dan Xu Z.K., 2003. *Separation of carbon dioxide from gas mixture by membrane contactor*. Environmental Science. 24. 34-38.

Zheng, J. M., Dai, Z. W., Wong, F.S., dan Xu Z, K. 2005. *Shell side mass transfer in a transverse flow hollow fiber membrane contactor*. Journal of Membrane Science 261. 114-120

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

APPENDIKS

I. Pengenceran Larutan MDEA

Larutan MDEA diencerkan dari konsentrasi 98% berat menjadi 30% berat. Perhitungan pengencerannya adalah sebagai berikut.

BM_{MDEA} = 119.17

Suhu air = 30ºC = 86ºF

$s.g._{MDEA}$ = 1,0418 (dari grafik 100% MDEA)

ρ_{air} = 0,995 g/cm3 (Geankoplis, 2003)

$$\rho_{MDEA} = s.g._{MDEA}\ x\ \rho_{air}$$

$$= 1{,}0418\ x\ 0{,}995$$

$$= 1{,}0365\ g/cm^3$$

Misal 1000 g MDEA. Untuk MDEA 98% berat :

$$m_{MDEA} = 1000\ x\ 0{,}98$$

$$= 980\ g$$

$$V_{MDEA} = \frac{m_{MDEA}}{\rho_{MDEA}}$$

$$= \frac{980}{1{,}0365}$$

$$= 945{,}489\ ml$$

$$V_{air} = \frac{1000 - m_{MDEA}}{\rho_{air}}$$

$$= \frac{1000 - 980}{0{,}995}$$

$$= 20{,}091\ ml$$

$$V_{total} = V_{MDEA} + V_{air}$$
$$= 945{,}489 + 20{,}091$$
$$= 965{,}580\ ml$$

$$n_{MDEA} = \frac{m_{MDEA}}{BM_{MDEA}}$$
$$= \frac{980}{119{,}17}$$
$$= 8{,}223\ mol$$

$$M_1 = \frac{n_{MDEA}}{V_{total}}$$
$$= \frac{8{,}223}{965{,}580 / 1000}$$
$$= 8{,}5161\ mol / L$$

Untuk MDEA 30% berat:

$$m_{MDEA} = 1000\, x\, 0{,}3$$
$$= 300\ g$$

$$V_{MDEA} = \frac{m_{MDEA}}{\rho_{MDEA}}$$
$$= \frac{300}{1{,}0418}$$
$$= 287{,}963\ ml$$

$$V_{air} = \frac{1000 - m_{MDEA}}{\rho_{air}}$$

$$= \frac{1000 - 300}{0,995}$$

$$= 703,185\, ml$$

$$V_{total} = V_{MDEA} + V_{air}$$

$$= 287,963 + 703,185$$

$$= 991,148\, ml$$

$$n_{MDEA} = \frac{m_{MDEA}}{BM_{MDEA}}$$

$$= \frac{300}{119.17}$$

$$= 2,517\, mol$$

$$M_2 = \frac{n_{MDEA}}{V_{total}}$$

$$= \frac{2,517}{991,148 / 1000}$$

$$= 2,539\, mol / L$$

Larutan MDEA 98% berat diencerkan menjadi 30% berat dengan volume 1 L. Pengenceran :

$$M_1 V_1 = M_2 V_2$$

$$V_1 = \frac{M_2 V_2}{M_1}$$

$$= \frac{2,539\, x 1}{8,5161}$$

$$= 0,2981\, L = 298,141\, ml$$

Jadi, dibutuhkan 298,141 ml MDEA 98% berat untuk membuat 1 liter MDEA 30% berat.

Menghitung kebutuhan Massa MDEA 30 %

Ditentukan :
Laju alir liquid masuk kontaktor membran = 100 mL/min
Waktu operasi = 25 menit
Volume larutan yang dibutuhkan :
$V_{larutan}$ = 100 mL/ menit x 25 menit
= 2500 mL
Dikarenakan terdapat 5 variasi laju alir gas masuk maka
$V_{larutan}$ = 2500 mL x 5
= 12500 mL
= 1,25 L

Pembuatan Larutan MDEA 29% + PZ 1% berat
Menghitung Densitas larutan

$m_{MDEA} = 1000\ x\ 0.29$
$= 290\ gr = 0{,}29\ kg$
$m_{PZ} = 1000\ x\ 0.01$
$= 10\ gr = 0{,}01\ kg$
$m_{air} = 1000 \text{ x } 0.7$
$= 700\ gr = 0{,}7\ kg$
Dapat dihitung volume masing-masing :

$$V_{MDEA} = \frac{m_{MDEA}}{\rho_{MDEA}}$$

$$= \frac{0{,}29\ kg}{1{,}083\ kg/L}$$

$$V_{DMEA} = 0{,}2783\ L$$

$$V_{PZ} = \frac{m_{PZ}}{\rho_{PZ}}$$

$$= \frac{0{,}01\ kg}{1{,}1\ kg/L}$$

$V_{PZ} \quad = 0{,}0091\ L$

$$V_{air} \quad = \frac{m_{air}}{\rho_{air}}$$

$$= \frac{0{,}7\ kg}{0{,}995\ kg/L}$$

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

Maka densitas Larutan MDEA 29% berat :

$$\rho_{larutan} = \frac{m_{MDEA} + m_{PZ} + m_{air}}{V_{MDEA} + V_{PZ} + V_{air}}$$

$$\rho_{larutan} = \frac{0{,}29 + 0{,}01 + 0{,}7}{0{,}2783 + 0{,}0091 + 0{,}7035}$$

$$\rho_{larutan} = 1{,}009\ kg/L = 1{,}009\ gr/cm^3$$

I.2.2 Menghitung Kebutuhan Massa MDEA dan Air

Ditentukan :

Laju alir liquid masuk kontaktor membran = 100 mL/menit

Waktu operasi = 15 menit

Maka, volume larutan yang dibutuhkan

$V_{larutan} \quad = 100\ \text{mL/menit x 25 menit}$

$\quad = 2500\ \text{mL}$

Dikarenakan terdapat 5 variasi laju alir gas masuk, maka

$V_{larutan} \quad = 2500\ \text{mL x 5}$

$\quad = 12500\ \text{mL}$

$\quad = 12{,}5\ \text{L}$

$$m_{larutan} = V_{larutan}\ x\ \rho_{larutan}$$
$$= 12{,}5 \text{ L x } 1{,}009 \text{ kg/L}$$
$$= 12{,}6125 \text{ kg}$$
$$= 12612{,}5 \text{ gr}$$

Maka massa masing-masing yang harus ditimbang :

- Dikarenakan MDEA yang tersedia adalah 98% berat sehingga

$$m_{MDEA} = \frac{29\%\ x\ m_{larutan}}{kemurnian}$$

$$= \frac{0{,}29 \text{ x } 12612{,}5}{0{,}98}$$

$$= 3732{,}27 \text{ gr}$$

- Dikarenakan PZ yang tersedia adalah 99% berat sehingga

$$m_{PZ} = \frac{1\%\ x\ m_{larutan}}{kemurnian}$$

$$= \frac{0{,}01 \text{ x } 12612{,}5}{0{,}99}$$
$$= 127{,}4 \text{ gr}$$

- $m_{air} = 70\%\ x\ m_{larutan}$
  $= 0{,}7 \text{ x } 12612{,}5$
  $= 8828{,}75 \text{ gr} = 8{,}828 \text{ kg}$

  atau

  $$V_{air} = \frac{m_{air}}{\rho_{air}}$$
  $$= \frac{8{,}828\ kg}{0{,}995\ kg/L}$$
  $$V_{air} = 8{,}8731\ L$$

Konsentrasi Larutan MDEA 29% berat adalah :

$$Molaritas = \frac{(m_{MDEA}/BM_{MDEA}) + (m_{PZ}/BM_{PZ})}{V_{larutan}}$$

$$= \frac{(3732{,}27/119{,}17) + (127{,}4/86{,}138)\ mol}{12{,}5\ L}$$

$$= 2{,}623\ M$$

Pembuatan Larutan MDEA 29% + MSG 1% berat
Menghitung Densitas larutan

m_{MDEA} $= 1000\ x\ 0.29$
$= 290\ gr = 0{,}29\ kg$

m_{MSG} $= 1000\ x\ 0.01$
$= 10\ gr = 0{,}01\ kg$

m_{air} $= 1000$ x 0.7
$= 700\ gr = 0{,}7\ kg$

Dapat dihitung volume masing-masing :

$$V_{MDEA} = \frac{m_{MDEA}}{\rho_{MDEA}}$$

$$= \frac{0{,}29\ kg}{1{,}083\ kg/L}$$

$$V_{MDEA} = 0{,}2783\ L$$

$$V_{MSG} = \frac{m_{PZ}}{\rho_{PZ}}$$

$$= \frac{0{,}01\ kg}{1{,}62\ kg/L}$$

$V_{PZ} \quad = 0{,}0061\ L$

$$V_{air} \quad = \frac{m_{air}}{\rho_{air}}$$

$$= \frac{0{,}7\ kg}{0{,}995\ kg/L}$$

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

Maka densitas Larutan MDEA 29% berat :

$$\rho_{larutan} = \frac{m_{MDEA} + m_{MSG} + m_{air}}{V_{MDEA} + V_{MSG} + V_{air}}$$

$$\rho_{larutan} = \frac{0{,}29 + 0{,}01 + 0{,}7}{0{,}2783 + 0{,}0061 + 0{,}7035}$$

$$\rho_{larutan} = 1{,}012\ kg/L = 1{,}012\ gr/cm^3$$

I.2.2 Menghitung Kebutuhan Massa MDEA dan Air

Ditentukan :

Laju alir liquid masuk kontaktor membran = 100 mL/menit

Waktu operasi = 15 menit

Maka, volume larutan yang dibutuhkan

$V_{larutan} \quad = 100\ \text{mL/menit x 25 menit}$

$= 2500\ \text{mL}$

Dikarenakan terdapat 5 variasi laju alir gas masuk, maka

$V_{larutan} \quad = 2500\ \text{mL x 5}$

$= 12500\ \text{mL}$

$= 12{,}5\ \text{L}$

$m_{larutan} \quad = V_{larutan}\ x\ \rho_{larutan}$

$= 12{,}5\ \text{L x } 1{,}012\ \text{kg/L}$

$= 12{,}65\ \text{kg}$

$= 12650$ gr

Maka massa masing-masing yang harus ditimbang :

- Dikarenakan MDEA yang tersedia adalah 98% berat sehingga

$$m_{MDEA} = \frac{29\%\ x\ m_{larutan}}{kemurnian}$$

$$= \frac{0{,}29 \text{ x } 12650}{0{,}98}$$

$= 3743{,}36$ gr

- Dikarenakan PZ yang tersedia adalah 99% berat sehingga

$$m_{MSG} = \frac{1\%\ x\ m_{larutan}}{kemurnian}$$

$$= \frac{0{,}01 \text{ x } 12650}{0{,}99}$$

$= 127{,}7$ gr

- $m_{air} = 70\%\ x\ m_{larutan}$

  $= 0{,}7 \text{ x } 12650$

  $= 8855$ gr = 8,855 kg

atau

$$V_{air} = \frac{m_{air}}{\rho_{air}}$$

$$= \frac{8{,}855\ kg}{0{,}995\ kg/L}$$

$$V_{air} = 8{,}8994\ L$$

Konsentrasi Larutan MDEA 29% berat adalah :

$$Molaritas = \frac{(m_{MDEA}/BM_{MDEA}) + (m_{PZ}/BM_{PZ})}{V_{larutan}}$$

$$= \frac{(3743{,}36\ /119{,}17) + (127{,}7/169{,}111)\ mol}{12{,}5\ L}$$

$$= 2{,}573\ M$$

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 CO_2 keluar. Dimana *flowrate* gas dapat dilihat dari *flowmeter,* % CO_2 didapat dari hasil analisa *Gas Chromatography,* dan CO_2 *loading* didapat dari hasil analisa titrasi chittick. Sedangkan untuk fluks dan efisiensi pemisahan CO_2 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang akan dijelaskan sebegai 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	300	mm
N	6500	
E	0,65	
A	1,39425	m^2

1. Contoh perhitungan fluks absorpsi dan desorpsi

Data hasil percobaan :

$Q_{CO2\ in}$ = (Q_{in} x C_{in}) = 40 ml/menit

$Q_{CO2\ out}$ = (Q_{out} x C_{out}) = 1 ml/menit

T_g = 30°C = 304,15 K

A = 1,39425 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).

Tg : suhu lingkungan (^{0}C)

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

- Fluks Absorpsi

$Q_{CO2\ in}$ = (Q_{in} x C_{in}) = 40 ml/menit

$$= \frac{40\ ml/menit\ x\ 273{,}15\ K}{22{,}4\ \frac{L}{mol}\ x\ 304{,}15\ k} = 1{,}604 \text{ mmol /menit}$$

= 0,027 mmol/s

$Q_{CO2\ out}$ = (Q_{out} x C_{out}) = 1 ml/menit

$$= \frac{1\ ml/menit\ x\ 273{,}15\ K}{22{,}4\ \frac{L}{mol}\ x\ 304{,}15\ k} = 0{,}04 \text{ mmol /menit}$$

= 0,00067 mmol/s

$$J_{CO_2} = \frac{(Q_{im}\ x\ C_{in} - Q_{out}\ x\ C_{out})}{x\ A}$$

$$= \frac{(0{,}027 - 0{,}00067)}{1{,}39425\ m^2\ x\ 1000} = 1{,}869 \text{ x } 10^{-5} \text{ mol/m}^2\text{.s}$$

- Fluks Desorpsi

$Q`_{CO2\ in}$ = ($Q`_{in}$ x $C`_{in}$) = 925 ml/menit

$$= \frac{925\ ml/menit\ x\ 273{,}15\ K}{22{,}4\ \frac{L}{mol}\ x\ 304{,}15\ k} = 37{,}085 \text{ mmol /menit}$$

= 0,618 mmol/s

$Q`_{CO2\ out}$ = ($Q`_{out}$ x $C`_{out}$) = 890 ml/menit

$$= \frac{890\ ml/menit\ x\ 273{,}15\ K}{22{,}4\ \frac{L}{mol}\ x\ 304{,}15\ k} = 35{,}682 \text{ mmol /menit}$$

= 0,5947 mmol/s

$$J`_{CO_2} = \frac{\left(Q`_{im}\ x\ C`_{in} - Q`_{out}\ x\ C`_{out}\right)}{x\ A}$$

$$= \frac{(0{,}618 - 0{,}5957)}{1{,}39425\ m^2\ x\ 1000} = 1{,}677 \text{ x } 10^{-5} \text{ mol/m}^2\text{.s}$$

2. Contoh perhitungan efisiensi absorpsi dan desorpsi

Data hasil percobaan :

$Q_{CO2\ in}$ = (Q_{in} x C_{in}) = 40 ml/menit

$Q_{CO2\ out}$ = (Q_{out} x C_{out}) = 1 ml/menit

$Q`_{CO2\ in}$ = ($Q`_{in}$ x $C`_{in}$) = 40 ml/menit

$Q`_{CO2\ out}$ = ($Q`_{out}$ x $C`_{out}$) = 1 ml/menit

- Efisiensi Absorpsi

$$\eta = \frac{Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out}}{Q_{in}\ x\ C_{in}} x100\%$$

$$\eta = \frac{0{,}027 - 0{,}00067}{0{,}027} \times 100\%$$

$$\eta = 97{,}5\%$$

- Efisiensi Desorpsi

$$\eta = \frac{Q`_{in} \times C`_{in} - Q`_{out} \times C`_{out}}{Q`_{in} \ x \ C`_{in}} x100\%$$

$$\eta = \frac{0,618 - 0,5947}{0,618} \times 100\%$$

$$\eta = 3,78\%$$

3. Contoh perhitungan CO_2 loading dengan titrasi *chittick*

Data hasil percobaan titrasi :

V_{gas} = 6,9 mL
V_{HCl} = 3,6 mL
P = 101, 325 Pa
T = 304,15 K
C_1 = 2,537 mol/L
V_1 = 2 mL

Dimana :

V_{gas} : perubahan volume larutan NaCl yang pada *measuring burette* (mL)
V_{HCl} : volume HCl yang diperlukan (mL)
P : tekanan atmosfer (Pa)
T : suhu ruangan (K)
C_1 : konsentrasi pelarut (mol/L)
V_1 : volume sampel pelarut (mL).

$$\alpha = \frac{mol(CO_2)}{mol(pelarut)} = \left[\frac{\frac{(V_{gas} - V_{HCl})(P)(273K)}{(101325Pa)(T)(22,4L/mol)}}{C_1V_1} \right]$$

$$\alpha = \frac{\frac{(6,9 - 3,6) \times 101,325 \times 273}{101325 \times 304,15 \times 22,4}}{2,537 \times 2}$$

$$\alpha = 0,026 \frac{mol(CO_2)}{mol(pelarut)}$$

II. Uji Pengaruh Parameter Operasi

II.1 Data Hasil Percobaan

II.1.1 Proses Absorpsi (konsentrasi CO_2 pada gas umpan 20% volume)

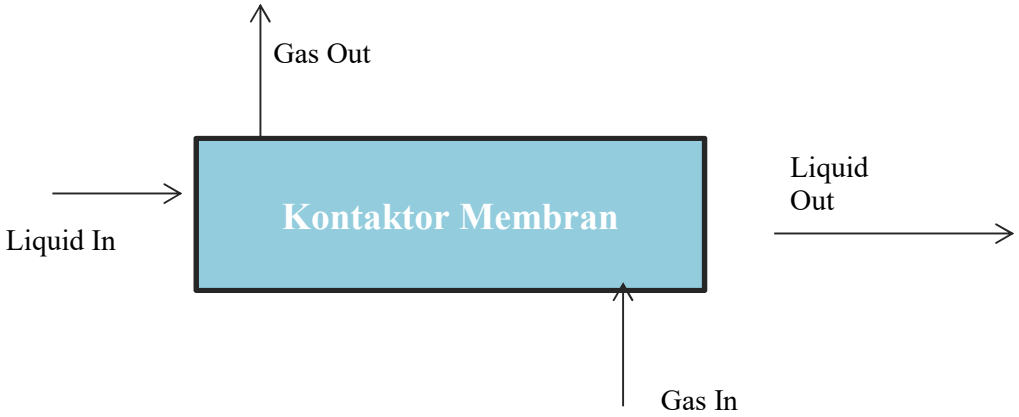
MDEA												
$QG_{,in}$	$QG_{,out}$	$QL_{,in}$	$QL_{,out}$	CO_2 feed gas			CO_2 sales gas			Fluks abs.	Efisiensi	CO_2 Loading
(mL/mi)	(ml/mi)	(ml/mi)	(ml/mi)	vol (mL/min)	mmol/min	mmol/s	vol (mL/ min)	mmol/min	mmol/s	(mol/m².s)	(%)	
200	180	100	80	40	1,603	0,027	1	0,040	0,001	1,8679E-05	97,5	0,002
300	280	100	80	60	2,404	0,040	1,8	0,072	0,001	2,7875E-05	97	0,011
400	380	100	80	80	3,205	0,053	4	0,160	0,003	3,64E-05	95	0,019
500	480	100	80	100	4,007	0,067	7	0,280	0,005	4,4542E-05	93	0,028
600	580	100	80	120	4,808	0,080	16,2	0,649	0,011	4,9715E-05	86,5	0,036
MDEA PZ												
$QG_{,in}$	$QG_{,out}$	$QL_{,in}$	$QL_{,out}$	CO_2 feed gas			CO_2 sales gas			Fluks abs.	Efisiensi	CO_2 Loading
(mL/min)	(ml/min)	(ml/min)	(ml/min)	vol (mL/min)	mmol/min	mmol/s	vol (mL/ min)	mmol/min	(mL/min)	(mol/m².s)	(%)	
200	100	100	85	40	1,603	0,027	0,225	0,009	0,0002	1,905E-05	99,438	0,027
300	160	100	85	60	2,404	0,040	0,35	0,014	0,0002	2,8569E-05	99,417	0,030
400	200	100	85	80	3,205	0,053	0,72	0,029	0,0005	3,7971E-05	99,1	0,034
500	280	100	85	100	4,007	0,067	2,3	0,092	0,0015	4,6793E-05	97,7	0,040
600	360	100	85	120	4,808	0,080	3,7	0,148	0,0025	5,5702E-05	96,917	0,058

MDEA MSG												
QG,in	QG,out	QL,in	QL,out	CO2 feed gas			CO_2 sales gas			Fluks abs.	Efisiensi	CO_2 Loading
(mL/min)	(ml/min)	(ml/min)	(ml/min)	vol (mL/min)	mmol/min	mmol/s	vol (mL/min)	mmol/min	mmol/s	(mol/m^2.s)	(%)	
200	100	100	85	40	1,603	0,027	0,3375	0,014	0,0002	1,89963E-05	99,15	0,026
300	160	100	85	60	2,404	0,040	2,01	0,081	0,0013	2,77742E-05	96,65	0,027
400	200	100	85	80	3,205	0,053	8,04	0,322	0,0054	3,44651E-05	89,95	0,031
500	280	100	85	100	4,007	0,067	18,3	0,733	0,0122	3,91301E-05	81,7	0,036
600	360	100	85	120	4,808	0,080	24,5	0,982	0,0164	4,57396E-05	79,58	0,048

II.1.2 Proses Desorpsi

MDEA										
Vacum Pressure	$QL_{,in}$	$QL_{,out}$	CO_2 Rich Solvent			CO_2 Solvent			Fluks Des.	Efisiensi
(cmHg abs)	(ml/min)	(ml/min)	mmol/min	mmol/s	α	mmol/min	mmol/s	α	(mol/m^2.s)	(%)
66	100	100	37,086	0,618	0,146	35,683	0,595	0,141	1,6774E-05	3,78
56	100	100	37,086	0,618	0,146	35,382	0,590	0,140	2,0369E-05	4,59
46	100	100	37,086	0,618	0,146	35,282	0,588	0,139	2,1567E-05	4,86
36	100	100	37,086	0,618	0,146	34,680	0,578	0,137	2,8756E-05	6,49
26	100	100	37,086	0,618	0,146	34,480	0,575	0,136	3,1152E-05	7,03
MDEA PZ										
Vacum Pressure	$QL_{,in}$	$QL_{,out}$	CO_2 Rich Solvent			CO_2 Solvent			Fluks Des.	Efisiensi
(cmHg)	(ml/min)	(ml/min)	mmol/min	mmol/s	α	mmol/min	mmol/s	α	(mol/m^2.s)	(%)
66	100	100	35,482	0,591	0,140	30,070	0,501	0,119	6,47E-05	15,25
56	100	100	35,482	0,591	0,140	29,669	0,494	0,117	6,9493E-05	16,38
46	100	100	35,482	0,591	0,140	29,669	0,494	0,117	6,9493E-05	16,38
36	100	100	35,482	0,591	0,140	29,268	0,488	0,115	7,4286E-05	17,51
26	100	100	35,482	0,591	0,140	28,566	0,476	0,113	8,2673E-05	19,49
MDEA MSG										
Vacum Pressure	$QL_{,in}$	$QL_{,out}$	CO_2 Rich Solvent			CO_2 Solvent			Fluks Des.	Efisiensi
(cmHg)	(ml/min)	(ml/min)	mmol/min	mmol/s	α	mmol/min	mmol/s	α	(mol/m^2.s)	(%)
66	100	100	34,981	0,583	0,138	31,406	0,523	0,124	4,2734E-05	10,22
56	100	100	34,981	0,583	0,138	30,805	0,513	0,122	4,9923E-05	11,94
46	100	100	34,981	0,583	0,138	30,671	0,511	0,121	5,1521E-05	12,32
36	100	100	34,981	0,583	0,138	30,470	0,508	0,120	5,3917E-05	12,89
26	100	100	34,981	0,583	0,138	30,270	0,504	0,119	5,6313E-05	13,47

Neraca Massa Kontaktor Membran



Konsentrasi Gas CO_2 masuk = 20% volume

Konsenstrasi CO2 pada Absorpsi MDEA 100 ml /min								
Q gas	Liq In		Liq Out		Gas In		Gas Out	
	ml/min	mmol/s	ml/min	mmol/s	ml/min	mmol/s	ml/min	mmol/s
200	0	0	33,25	0,022203	40	0,026711	6,75	0,004507
300	0	0	46,5	0,031051	60	0,040066	13,5	0,009015
400	0	0	60,05	0,0401	80	0,053422	19,95	0,013322
500	0	0	73,15	0,048848	100	0,066777	26,85	0,01793
600	0	0	81	0,05409	120	0,080133	39	0,026043
CO_2 pada Absorpsi MDEA PZ 100 ml /min								
Q gas	Liq In		Liq Out		Gas In		Gas Out	
	ml/min	mmol/s	ml/min	mmol/s	ml/min	mmol/s	ml/min	mmol/s
200	0	0	39,55	0,02641	40	0,026711	0,45	0,0003
300	0	0	59,3	0,039599	60	0,040066	0,7	0,000467
400	0	0	79,28	0,052941	80	0,053422	0,72	0,000481
500	0	0	97,7	0,065242	100	0,066777	2,3	0,001536
600	0	0	116,3	0,077662	120	0,080133	3,7	0,002471

CO2 pada Absorpsi MDEA MSG 100 ml /min								
Q gas	Liq In		Liq Out		Gas In		Gas Out	
	ml/min	mmol/s	ml/min	mmol/s	ml/min	mmol/s	ml/min	mmol/s
200	0	0	39,4	0,02631	40	0,026711	0,6	0,000401
300	0	0	57,3	0,038263	60	0,040066	2,7	0,001804
400	0	0	69,35	0,04631	80	0,053422	10,65	0,007116
500	0	0	75,85	0,050651	100	0,066777	24,15	0,016137
600	0	0	86,85	0,057996	120	0,080133	33,15	0,022151

Konsenstrasi CO2 pada proses Desorpsi MDEA				
Q gas	Liq In	Liq Out	Gas In	Gas Out
	mmol/s	mmol/s	mmol/s	mmol/s
200	0,618096	0,594708	0	0,023387
300	0,618096	0,589697	0	0,028399
400	0,618096	0,588026	0	0,03007
500	0,618096	0,578003	0	0,040093
600	0,618096	0,574662	0	0,043434

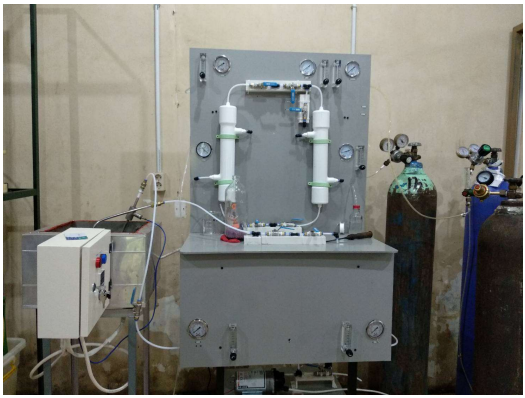
Konsenstrasi CO2 pada proses Desorpsi MDEA-PZ				
Q gas	Liq In	Liq Out	Gas In	Gas Out
	mmol/s	mmol/s	mmol/s	mmol/s
200	0,591367	0,501159	0	0,090209
300	0,591367	0,494477	0	0,096891
400	0,591367	0,489465	0	0,101902
500	0,591367	0,487795	0	0,103573
600	0,591367	0,467748	0	0,123619

Konsenstrasi CO2 pada proses Desorpsi MDEA-MSG				
Q gas	Liq In	Liq Out	Gas In	Gas Out
	mmol/s	mmol/s	mmol/s	mmol/s
200	0,583015	0,523433	0	0,059582
300	0,583015	0,513409	0	0,069605
400	0,583015	0,511182	0	0,071833
500	0,583015	0,507841	0	0,075174
600	0,583015	0,5045	0	0,078515

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

LAMPIRAN GAMBAR

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)

DAFTAR NOTASI

A	Luas kontak gas-cair	(m^2)
BM	Berat molekul	-
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	Lajualir gas	(ml/menit)
T_g	Temperatur gas	(K)
X	Fraksi mol	-
η	Persentase CO_2 yang terambil	(%)
θ	Sudut kontak	(^{o})

RIWAYAT HIDUP PENULIS I

Izhar Mirza Hardian, penulis kelahiran Surabaya, 16 Oktober 1995. Kini berdomisili di Kota Malang, Jawa Timur. Penulis telah menempuh pendidikan formal diantaranya SDN 1 Kepatihan Banyuwangi, SMPN 3 Malang dan SMAN 1 Malang. Selama menempuh pendidikan S-1 di Departemen Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Penulis aktif di beberapa organisasi di Departemen Teknik Kimia ITS, diantaranya sebagai *Section Head of Fundrising Entrepreneurship Development* Himpunan Mahasiswa Teknik Kimia ITS (HIMATEKK FTI - ITS). Penulis berpengalaman kerja praktik di PT Semen Tonasa pada tahun Juni – Juli 2017. Pada akhir studi, penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa tugas akhir Pra Desain Pabrik dengan judul, **"Pembuatan Garam Industri dari Air Laut"** dan skripsi dengan judul, **"Pemisahan CO_2 Menggunakan Kontaktor Membran *Hollow Fiber* Polipropilena dengan Pelarut MDEA Teraktivasi".**

Biodata Penulis I

Nama : Izhar Mirza Hardian
TTL : Surabaya, 16 Oktober 1995
Alamat : Jl Kunta Bhaswara II No 6. Malang, Jawa Timur
No. HP : +62 813 6167 5643
Email : biohardian16@gmail.com

RIWAYAT HIDUP PENULIS II

Muhamad Aziz Rahmatullah, lahir di Tulungagung, 6 Maret 1996. Penulis yang sering dipanggil Aziz ini, menyelesaikan pendidikan dasarnya di di MI Manbaul Ulum Buntaran, dan untuk pendidikan menengahnya di MTsN Aryojeding dan SMAN 1 Rejotangan. Kemudian penulis melanjutkan studinya di Teknik Kimia ITS. Selama menempuh kuliah, penulis aktif dalam kegiatan organisasi kemahasiswaan kampus, antara lain di Departemen Media Informasi Islam KINI Teknik Kimia FTI-ITS 2015-2017. Pada tahun ke 3, penulis melaksanakan Kerja Praktek di PT. Semen Tonasa, Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan, Sulawesi Selatan. Pada akhir studi, penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa tugas akhir Pra Desain Pabrik dengan judul, **"Pembuatan Garam Industri dari Air Laut"** dan skripsi dengan judul, **"Pemisahan CO_2 Menggunakan Kontaktor Membran *Hollow Fiber* Polipropilena dengan Pelarut MDEA Teraktivasi".**

Biodata Penulis II

Nama : Muhamad Aziz Rahmatullah
TTL : Tulungagung, 6 Maret 1996
Alamat : Jl Raya Buntaran. Tulungagung, Jawa Timur
No. HP : +62 857 912 016 20
Email : azizrahmatullah2@gmail.com