



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KINERJA KONTAKTOR MEMBRAN SERAT
BERONGGA PADA PROSES ABSORPSI GAS CO₂
MENGUNAKAN PELARUT *DIETHANOLAMINE* (DEA)**

SKRIPSI

**PAN ADE NATA
04 05 06 049Y**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KINERJA KONTAKTOR MEMBRAN SERAT
BERONGGA PADA PROSES ABSORPSI GAS CO₂
MENGUNAKAN PELARUT *DIETHANOLAMINE* (DEA)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**PAN ADE NATA
04 05 06 049Y**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Pan Ade Nata

NPM : 040506049Y

Tanda Tangan : 

Tanggal : 26 Juni 2009

HALAMAN PENGESAHAN


Skripsi ini diajukan oleh,

Nama : Pan Ade Nata
NPM : 04 05 06 049Y
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Studi Kinerja Kontaktor Membran Serat Berongga
pada Proses Absorpsi CO₂ dengan Menggunakan
Pelarut *Diethanolamine* (DEA)

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

DEWAN PENGUJI

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

Penguji : Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA ()

Penguji : Ir. Yuliusman M.Eng. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 2 Juli 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

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

- (1) Bapak Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing skripsi sekaligus pembimbing akademis yang rela meluangkan waktu dalam penyusunan dan pemeriksaan tulisan ini
- (2) Mama tercinta sebagai ‘dosen pembimbing’ dalam kehidupan yang telah memberikan banyak kasih sayang dan nasihat sehingga skripsi ini dapat dibuat
- (3) Ayah, Ka’ Ve, Ega, dan Rey sebagai keluarga yang selalu memberi semangat dan bantuan baik moril ataupun dana untuk menyelesaikan skripsi ini
- (4) Semua orang yang tidak dapat disebutkan satu demi satu, yang selalu memberikan bantuan semangat dikala susah

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 26 Juni 2009

Pan Ade Nata

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

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

Nama : Pan Ade Nata
NPM : 040506049Y
Program studi : S1
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Fakultas Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**Studi Kinerja Kontaktor Membran Serat Berongga pada Proses Absorpsi
CO₂ dengan Menggunakan Pelarut *Diethanolamine* (DEA)**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 2 Juli 2009

Yang menyatakan

(Pan Ade Nata)

ABSTRAK

Nama : Pan Ade Nata
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Studi Kinerja Teknologi Kontaktor Membran Serat Berongga Pada Proses Absorpsi CO₂ Menggunakan Pelarut DEA (Diethanolamine)

Gas alam hasil eksplorasi mengandung senyawa karbondioksida yang keberadaannya merugikan. Teknologi pemisahan CO₂ yang dipakai sekarang ini umumnya menggunakan proses absorpsi melalui kolom konvensional dengan pelarut amina. Sebagai alternatif, teknologi kontaktor membran serat berongga telah dikembangkan untuk proses ini. Penelitian menggunakan membran polipropilen yang bersifat hidrofobik. Evaluasi difokuskan pada studi perpindahan massa dalam proses absorpsi CO₂ oleh larutan DEA (Diethanolamine) dengan variasi jumlah serat dan laju alir pelarut. Hasil yang diperoleh menunjukkan peningkatan laju alir akan meningkatkan nilai koefisien perpindahan massa dan fluks CO₂. Sementara penambahan jumlah serat akan menurunkan nilai koefisien perpindahan massa dan fluks CO₂.

Kata kunci: Membran serat berongga, dietanolamin, perpindahan massa

ABSTRACT

Name : Pan Ade Nata
Study Program : Chemical Engineering
Title : Study of Performance of Hollow Fiber Membrane Contactor in CO₂ Absorption Process Using DEA (Diethanolamine) Solvent

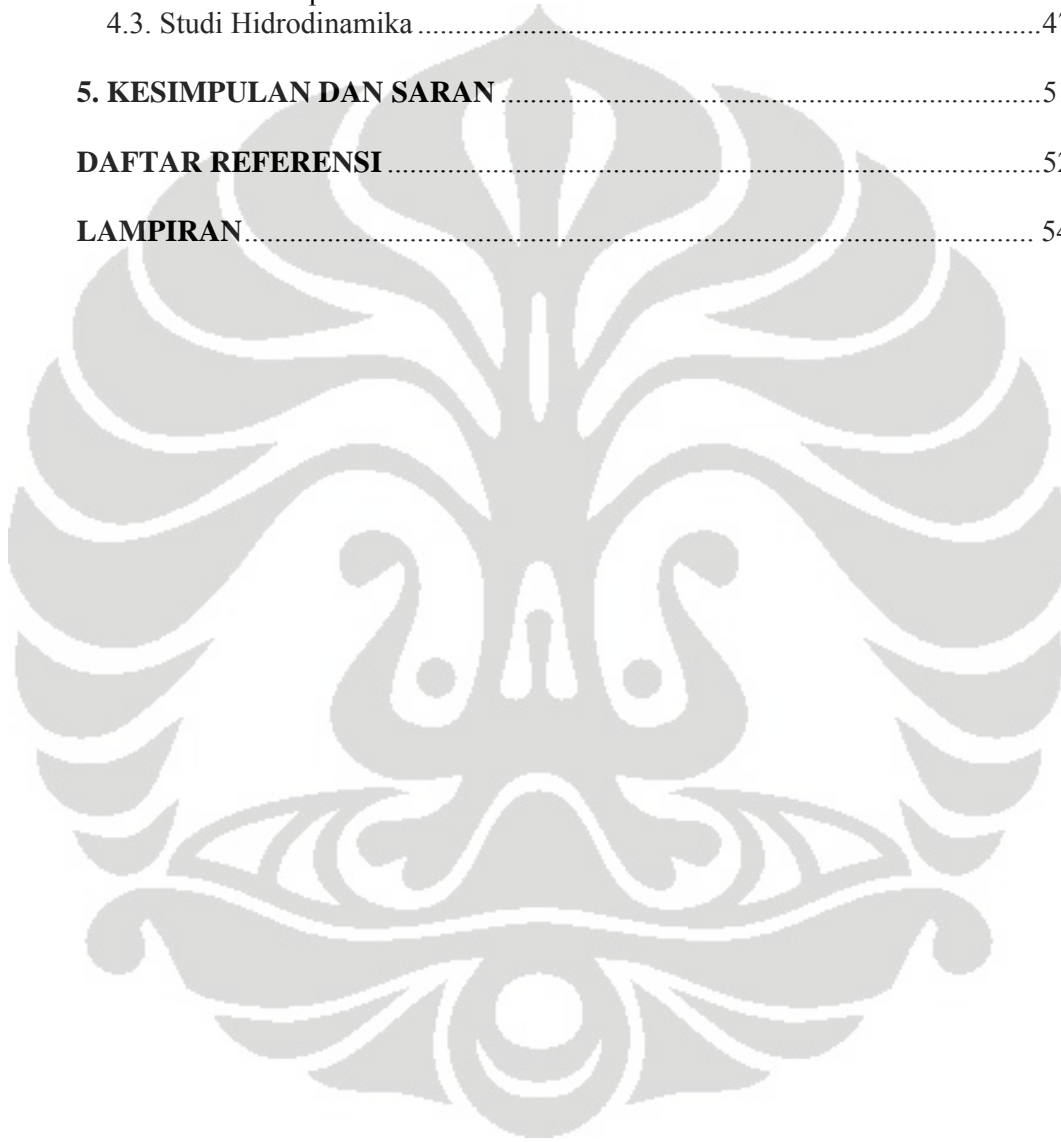
Natural gas produced by the exploration contained the carbon dioxide compound that this existence can damage the system. Separation technology CO₂ that is worn now generally used the process of the absorption through the conventional column with amine solvent. As the alternative, the hollow fiber membrane contactor technology was developed for this process. The research was carried out by using the membrane polypropilen that was hydrophobic. Evaluation was focused on the study of mass transfer in the CO₂ absorption process by the DEA (Diethanolamine) solution with the variation of the amount of fiber and the solvent flow rate. Results that were received showed the increase of solvent flow rate will increase the value of the mass transfer coefficient and flux of CO₂. While the increase amount of fiber will reduce the value of the mass transfer coefficient and flux of CO₂.

Key word: Hollow Fiber Membrane, Diethanolamine, Mass Transfer

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
DAFTAR NOTASI.....	xii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	5
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Sistematika Penulisan.....	5
2. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Proses Absorpsi CO ₂	7
2.2 Pelarut Pada Absorpsi CO ₂	9
2.2.1 Pelarut Senyawa Amina.....	9
2.2.2 Pelarut Senyawa Alkali Hidroksida.....	10
2.3 Teknologi Membran.....	11
2.4 Membran Berpori.....	12
2.5 Membran Polipropilen.....	14
2.6 Kontaktor Membran.....	15
2.7 Kontaktor Membran Serat Berongga.....	16
2.8 Aplikasi Kontaktor Membran Serat Berongga.....	20
2.9 Studi Perpindahan Massa pada Kontaktor Membran.....	20
2.10 Studi Hidrodinamika Air pada Kontaktor Membran Serat Berongga.....	25
3. METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1. Pendahuluan.....	27
3.2. Metode Penelitian.....	26
3.2.1 Diagram Alir Penelitian.....	26
3.2.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	29
3.3 Skema Alat.....	30
3.4 Prosedur Penelitian.....	31
3.5 Kondisi Operasi.....	32
3.6 Pengolahan Data.....	32
3.6.1 Pengujian Perpindahan Massa.....	32
3.6.2 Pengujian Hidrodinamika.....	33

4. HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1. Studi Perpindahan Massa	34
4.1.1 Pengaruh Laju Alir Pelarut	34
4.1.2 Pengaruh Jumlah Serat.....	35
4.1.3 Fluks Perpindahan Massa.....	37
4.1.4 Pengaruh Jenis Pelarut	38
4.1.5 Pengaruh Jenis Gas Umpan.....	41
4.2. Korelasi Perpindahan Massa.....	43
4.3. Studi Hidrodinamika	47
5. KESIMPULAN DAN SARAN	51
DAFTAR REFERENSI	52
LAMPIRAN	54



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Absorpsi CO ₂ oleh suatu larutan melewati membran	9
Gambar 2.2	Skema Aliran Fasa Gas dan Cair pada Membran	11
Gambar 2.3	Membran berpori dan membran tidak berpori	12
Gambar 2.4	Struktur Kimia Polipropilen	14
Gambar 2.5	Struktur Molekul Polipropilen Ataktik	14
Gambar 2.6	Struktur Polipropilen Isotaktik	15
Gambar 2.7	Perbandingan Luas Permukaan Spesifik Teknologi Absorpsi	16
Gambar 2.8	Kontaktor Membran serat berongga	17
Gambar 2.9	Perpindahan Massa pada Membran	21
Gambar 3.1	Kontaktor membran serat berongga	28
Gambar 3.2	Diagram Alir Penelitian	28
Gambar 3.3	Skema alat penelitian	30
Gambar 3.4	Rangkaian alat penelitian	31
Gambar 4.1	Absorpsi CO ₂ untuk umpan gas campuran CO ₂ /CH ₄	35
Gambar 4.2	Nilai koefisien perpindahan massa CO ₂ dengan variasi laju alir pelarut DEA serta variasi umpan gas	36
Gambar 4.3	Variasi koefisien perpindahan massa terhadap kecepatan linier pelarut DEA untuk setiap modul	37
Gambar 4.4	Variasi jumlah serat modul terhadap koefisien perpindahan massa pada setiap laju alir pelaut DEA	38
Gambar 4.5	Variasi Fluks terhadap kecepatan linier untuk pelarut DEA untuk setiap jumlah serat	39
Gambar 4.6	Nilai koefisien perpindahan massa CO ₂ dengan variasi kecepatan linier untuk setiap pelarut	41
Gambar 4.7	Perbandingan Bilangan Reynolds terhadap Sherwood pada variasi jumlah serat	42
Gambar 4.8	Perbandingan Bilangan Re ^{nb} terhadap Sherwood pada variasi jumlah serat	43
Gambar 4.9	Hubungan nilai koefisien dengan fraksi kerapatan membran	44
Gambar 4.10	Hubungan Reynold terhadap Sherwood untuk jumlah serat sebanyak 10	45
Gambar 4.11	Hubungan Reynold terhadap Sherwood untuk jumlah serat sebanyak 15	45
Gambar 4.12	Hubungan Reynold terhadap Sherwood untuk jumlah serat sebanyak 20	46
Gambar 4.13	Profil penurunan tekanan terhadap variasi kecepatan aliran	47
Gambar 4.14	Hubungan bilangan Reynold dengan penurunan tekanan	48
Gambar 4.15	Hubungan bilangan Reynold terhadap faktor friksi	49
Gambar 4.16	Hubungan bilangan Reynold terhadap rasio friksi	50

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan sifat-sifat karakteristik senyawa amina.....	10
Tabel 2.2 Aplikasi Kontaktor Membran Serar Berongga	20
Tabel 4.1 Perbandingan Faktor Reaksi antara Air, NaOH dan DEA.....	41
Tabel 4.2 Koefisien dan fraksi kepadatan membran untuk setiap modul	44



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A DATA HASIL PENELITIAN	54
A.1 Data Penelitian Studi Perpindahan Massa Pelarut Air	54
A.2 Data Penelitian Studi Perpindahan Massa Pelarut DEA	55
A.3 Data Penelitian Studi Perpindahan Massa Umpan Gas CO ₂ /CH ₄	56
A.4 Data Penelitian Studi Hidrodinamika	56
LAMPIRAN B CONTOH PERHITUNGAN	57
B.1 Perhitungan Studi Perpindahan Massa	57
B.1.1 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Untuk Air.....	57
B.1.2 Perhitungan Korelasi Perpindahan Massa Pelarut Air	60
B.1.3 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Untuk DEA.....	63
B.1.4 Perhitungan Korelasi Perpindahan Massa Pelarut DEA	65
B.2 Studi Hidrodinamika.....	67
LAMPIRAN C DATA HASIL PERHITUNGAN	69
C.1 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa	70
C.2 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa	71



DAFTAR NOTASI

Simbol	Keterangan
a	Luas permukaan spesifik kontaktor [m^2/m^3]
C^*	Konsentrasi gas saat kesetimbangan [mol/L]
C_t	Konsentrasi <i>gas cair</i> pada saat t [mol/L]
d_e	Diameter ekivalen kontaktor [m]
d_p	Diameter selongsong kontaktor [cm]
D	Difusivitas oksigen di dalam air [m^2/s]
f	Faktor friksi
H	Konstanta Hukum Henry
J	Fluks, $\text{g}/\text{m}^2\text{h}$
K, k_G, k_M dan k_L	Koefisien perpindahan massa keseluruhan, fasa gas, membran dan cairan [m/s]
l	Panjang serat [m]
n	Jumlah serat
Q_1	Laju alir air di dalam kontaktor [m^3/s]
Re	Bilangan Reynold
Sc	Bilangan Schmidt
Sh	Bilangan Sherwood
t	Waktu [s]
v_L	Kecepatan alir fasa cair / laju sirkulasi DEA [m/s]
V	Volume Reservoir [m^3]
ε	Rasio volume kosong void fraction
ΔP	Penurunan tekanan, Pa
φ	Fraksi kepadatan membran di dalam kontaktor
μ	Viskositas [poise]
ν	Viskositas kinematik [cm^2/s]
ρ	densitas [g/cm^3]

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tidak stabilnya harga *crude oil* telah menempatkan gas alam sebagai salah satu sumber energi menjadi kebutuhan utama bagi industri maupun masyarakat umum. Terlebih, setelah Pemerintah Indonesia telah melakukan konversi *kerosene* (minyak tanah) menjadi gas *elpiji* untuk kebutuhan bahan bakar rumah tangga. Oleh sebab itu, gas alam perlu diolah secara efektif untuk menekan biaya kapital dan operasional dari proses pengolahan tersebut agar harga dari produk gas alam (terutama LPG) dapat terjangkau oleh seluruh lapisan masyarakat.

Pada dasarnya, gas alam hasil eksplorasi mengandung senyawa *impurities* (pengotor). Umumnya, *impurities* dengan kandungan yang paling besar dalam gas alam adalah senyawa karbondioksida (CO_2). Keberadaan CO_2 didalam gas alam bersifat merugikan karena dapat menurunkan nilai kalor pembakaran (*heating value*) pada turbin sehingga efisiensi kerja turbin tidak maksimal. Sifatnya yang korosif dapat merusak bagian dalam peralatan pabrik dan sistem perpipaan. Selain itu, CO_2 dapat memadat pada suhu yang sangat rendah dan dapat mengakibatkan tersumbatnya sistem perpipaan pada proses pengolahan lebih lanjut (Dortmundt dan Doshi, 1999). Hal ini menjadikan proses pemisahan CO_2 dari kandungan gas alam sangat penting keberadaannya di dalam industry pengolahan gas alam.

Berbagai teknologi telah digunakan pada proses pemisahan CO_2 dari gas alam. Teknologi tersebut dikembangkan dengan berbagai variasi proses fisika dan kimia seperti absorpsi, adsorpsi, distilasi kriogenik, dan teknologi membran. Proses pemisahan CO_2 melalui kolom absorpsi konvensional dengan menggunakan pelarut senyawa amina (MEA, DEA, MDEA, dan AMP) merupakan teknologi yang dominan digunakan pada industri pengolahan gas alam. Namun, kolom konvensional ini memiliki beberapa kelemahan yaitu konsumsi energi yang cukup besar dan memiliki kendala pada proses operasional karena sering terjadinya berbagai masalah seperti *flooding*, *loading*, *channeling*, *foaming*, dan *entrainment* (Al-Marzouqi et.al, 2007). Kelemahan ini membuat

kolom konvensional tidak ekonomis dan tidak efektif dalam proses operasional. Oleh karena itu perlu dicari alternatif lain yang lebih efisien.

Beberapa tahun terakhir ini, kontaktor membran telah dikembangkan sebagai alternatif dalam proses pemisahan CO₂ untuk keperluan komersial dengan potensi yang menguntungkan dari sisi ekonomi dan efektivitas operasional. Ukuran kontaktor membran yang relatif jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan kolom konvensional membuat teknologi ini bersifat lebih ekonomis karena tidak membutuhkan biaya kapital dan operasional yang cukup besar. Selain itu, kontaktor membran memiliki beberapa keuntungan lain seperti konsumsi energi yang relatif lebih rendah, luas permukaan kontak yang relatif lebih besar, *scale-up* dapat dilakukan dengan mudah karena modul membran fleksibel untuk disusun dan dalam proses operasional kontaktor membran laju alir dapat divariasikan secara bebas sehingga berbagai kendala yang biasa terjadi dalam proses operasional kolom konvensional seperti *flooding*, *foaming*, dan *entrainment* dapat dicegah. (Li dan Chen, 2005)

Keunggulan lainnya adalah kontaktor membran tidak mencemari lingkungan karena tidak ada zat aditif yang digunakan dalam membran serta tidak boros dalam pemakaian pelarut (Gabelman dan Hwang, 1999). Kelebihan utama alat ini adalah mudah untuk dikombinasikan dengan unit operasi lain sehingga sangat aplikatif pada proses pengolahan gas alam di dalam industri. Kelemahan utama dari kontaktor membran ialah pada bentuk aliran pelarut dan gas yang laminar. Aliran laminar ini menyebabkan koefisien perpindahan massa pada membran memiliki nilai dengan kualitas yang lebih rendah dibandingkan kolom konvensional. Selain itu, adanya tahanan membran dapat menaikan tahanan perpindahan massa yang dapat menurunkan nilai koefisien perpindahan massa. (Li dan Chen, 2005)

Kontaktor membran yang mulai dikembangkan beberapa tahun terakhir dalam proses absorpsi CO₂ ialah kontaktor membran serat berongga dengan kelebihan memiliki luas permukaan kontak yang cukup signifikan. Kontaktor membran serat berongga merupakan membran kapiler yang terdiri dari bagian *shell* dan *tube*. Membran ini merupakan serat sintesis yang terbuat dari salah satu polimer yaitu polipropilen. Pemilihan polipropilen sebagai bahan pembuat

membran didasarkan oleh harganya yang cukup ekonomis dan sifatnya yang sangat hidrofob sehingga air tidak dapat membasahi membran saat terjadi proses kontak. Pada proses operasinya, kontaktor membran serat berongga menggunakan perbedaan konsentrasi sebagai gaya dorong (*driving force*) (Li dan Chen, 2005). Kontak yang terjadi antara fasa cair dan gas bersifat non-dispersif sehingga tidak terjadi kontak secara langsung antara pelarut dengan CO₂. Dasar pemisahan CO₂ dengan menggunakan membran serat berongga berdasarkan perbedaan permeabilitas terhadap membran. Model perpindahan massa didasarkan pada teori difusivitas yang dikembangkan untuk fasa gas. Perpindahan massa pada kontaktor membran serat berongga dianalogikan sebagai perpindahan panas dalam aliran laminar pada saluran pipa. Dimana pengaruh diameter serat, viskositas pelarut, dan laju alir pelarut pada proses perpindahan massa tidak dapat diabaikan. (Zhang et.al, 2006)

Fasa cair yang digunakan dalam penelitian ini berupa air dan pelarut *diethanolamine* (DEA). Air dipakai sebagai pelarut pembanding. Penggunaan DEA sebagai pelarut disebabkan karena larutan ini telah digunakan secara komersil dalam proses pemurnian gas alam dari senyawa impuritis seperti CO₂ dengan kelebihan mudah diregenerasi dan memiliki korosifitas yang cukup rendah dibanding senyawa sejenisnya (Wang et.al, 2004). Kelebihan lain dari DEA ialah memiliki tekanan uap yang rendah (0.577 mmHg (25 °C), Perry's Che Handbook 8th.ed) sehingga tidak mudah menguap dan terutama harganya yang relatif lebih murah dibandingkan dengan pelarut sejenisnya. Namun, sama seperti pelarut sejenisnya senyawa ini tergolong kedalam bahan kimia berbahaya (Environmental Protection Agency, 2000) sehingga memerlukan penanganan yang serius dalam pemakaiannya. Jadi, pemilihan DEA lebih disebabkan kepada keekonomisan dan keefektifannya sebagai pelarut untuk proses absorpsi CO₂ dibandingkan dengan pelarut sejenisnya.

Mekanisme perpindahan massa yang terjadi meliputi proses absorpsi secara fisika dan absorpsi secara kimia. Absorpsi CO₂ oleh air terjadi secara fisika, CO₂ diserap tanpa disertai reaksi kimia ke dalam pelarut. Proses tersebut dipengaruhi oleh difusivitas CO₂ ke dalam air. Sementara absorpsi CO₂ oleh pelarut DEA terjadi secara kimia meliputi reaksi kimia antara CO₂ dengan pelarut.

Penggunaan pelarut air dan pelarut DEA bertujuan untuk membandingkan efektivitas perpindahan massa dari kedua pelarut ini. Pada umumnya, proses absorpsi secara fisika ditetapkan sebagai nilai acuan sehingga pada penelitian ini air dijadikan sebagai dasar untuk membandingkan efektivitas pelarut DEA pada penggunaan kontaktor membran serat berongga didalam proses penyerapan CO₂ (Zhang et.al, 2006). Efektivitas dibandingkan melalui studi hidrodinamika yaitu friksi dan penurunan tekanan serta studi perpindahan massa, dalam hal ini koefisien perpindahan massa.

Proses absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga telah diteliti dengan menggunakan berbagai variasi pelarut, terutama pelarut senyawa amina. Penelitian yang dilakukan oleh Wang dkk. (2004) menunjukkan bahwa DEA dan AMP lebih baik dalam melarutkan CO₂ dibandingkan dengan MDEA. Pada penelitian lebih lanjut Wang dkk. (2004) menyimpulkan bahwa konsentrasi pelarut DEA yang tinggi dapat menyebabkan degradasi sifat hidrofobik dari membran dan lebih buruk lagi dapat menyebabkan kerusakan pada membran. Kemudian, penelitian yang dilakukan Zhang dkk. (2006) memperoleh hasil panjang modul efektif membran (l_{eff}) untuk proses absorpsi CO₂ sebesar 40 cm sampai 60 cm. Zhang dkk. juga menyimpulkan bahwa variasi laju alir gas tidak akan berpengaruh secara signifikan terhadap efektifitas absorpsi CO₂. Subihi (2007) melakukan penelitian dengan susunan modul yang sama menggunakan pelarut air dan NaOH. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa untuk kedua pelarut peningkatan kecepatan linier pelarut berbanding lurus dengan peningkatan nilai koefisien perpindahan massa. Penelitian ini sendiri merupakan bagian dari pengembangan membran serat berongga sebagai kontaktor dalam proses absorpsi CO₂ oleh pelarut DEA untuk keperluan komersil dengan fokus pada evaluasi efektivitas kinerja kontaktor. Evaluasi dilakukan dengan melihat pengaruh laju alir pelarut serta jumlah serat modul berdasarkan studi perpindahan massa dan hidrodinamika. Selanjutnya dibuat suatu kesimpulan dari hasil yang diperoleh. Kemudian dari kesimpulan tersebut dapat ditentukan kondisi yang sesuai agar kinerja kontaktor membran serat berongga untuk proses absorpsi CO₂ menggunakan pelarut DEA lebih optimal.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah tersebut maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana pengaruh laju alir pelarut dan jumlah serat modul terhadap efektivitas proses absorpsi CO₂ melalui membran serat berongga menggunakan pelarut DEA serta efektifitasnya dibandingkan dngan menggunakan pelarut lain pada konfigurasi modul dan variasi variabel yang sama.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- Mengevaluasi pengaruh laju alir serta variasi jumlah serat terhadap proses penyerapan CO₂ menggunakan pelarut dietanolamin (DEA) melalui kontaktor membran serat berongga.
- Mengevaluasi efektivitas kinerja kontaktor membran serat berongga dalam proses absorpsi CO₂ menggunakan menggunakan pelarut Diethanolamine (DEA) melalui studi perpindahan massa.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan modul membran serat berongga yang terbuat dari polipropilen sebagai kontaktor gas-cair.
2. Menggunakan pelarut air terdistilasi dan pelarut *Diethanolamine* (DEA) 0,0015 M sebagai absorben bagi gas CO₂.
3. Variabel tetap dalam penelitian ini adalah diameter membran, panjang modul, diameter selongsong modul, dan laju alir gas umpan
4. Variabel bebas dalam percobaan ini adalah laju alir pelarut dan jumlah serat di dalam modul.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan adalah sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berisi dasar teori yang digunakan untuk menjelaskan masalah.

BAB 3 METODE PENELITIAN

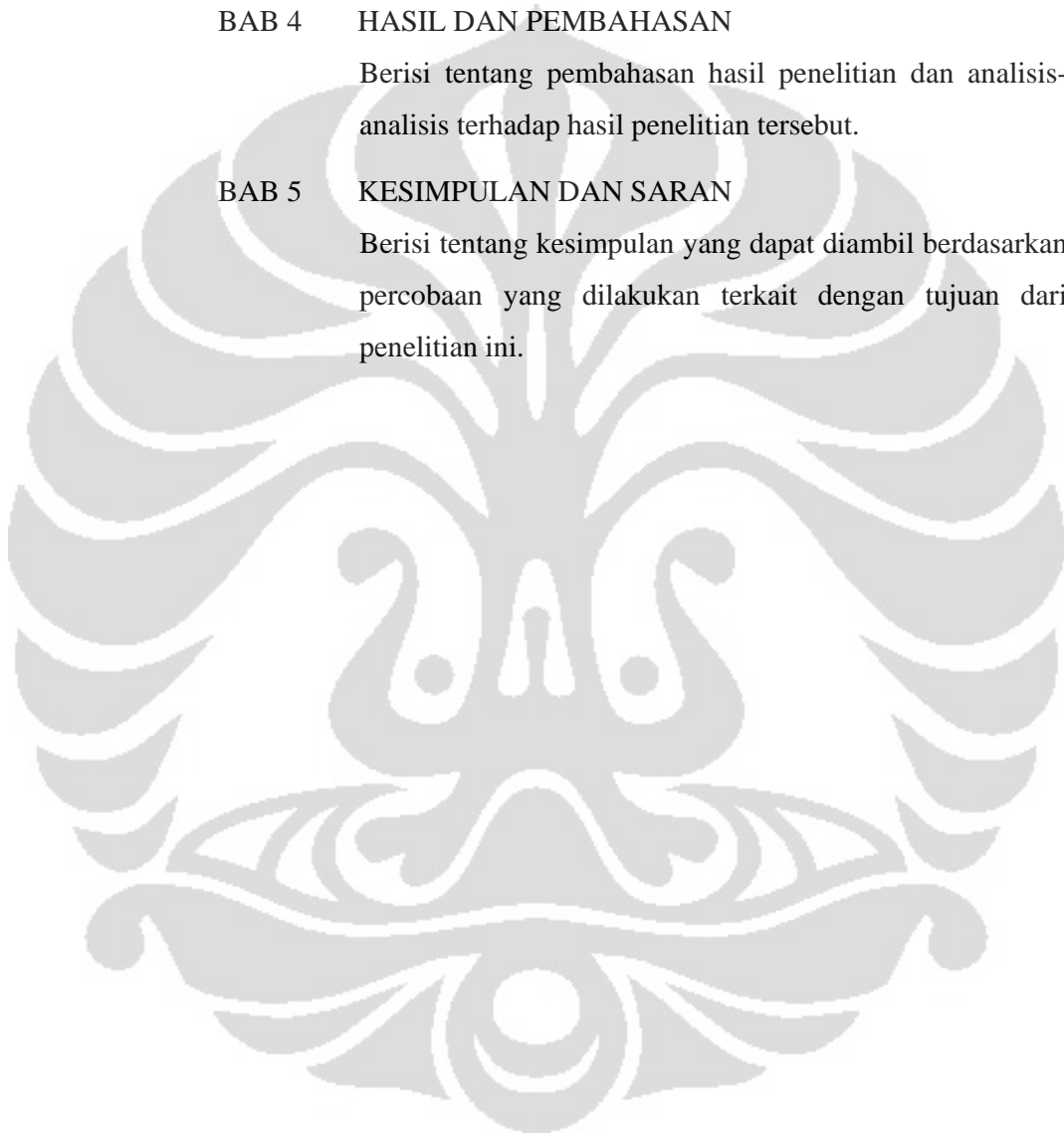
Berisi tentang metode yang digunakan dalam penelitian ini

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang pembahasan hasil penelitian dan analisis-analisis terhadap hasil penelitian tersebut.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan percobaan yang dilakukan terkait dengan tujuan dari penelitian ini.

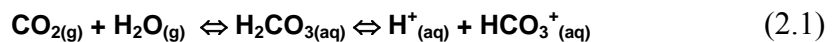


BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Proses Absorpsi CO₂

Secara sederhana proses absorpsi dapat didefinisikan sebagai suatu peristiwa terlarutnya suatu gas ke dalam suatu pelarut cair melalui mekanisme perpindahan massa. Mekanisme perpindahan massa yang terjadi sebagian besar dikontrol oleh laju difusi. Dimana laju difusi tersebut dipengaruhi secara langsung oleh perbedaan konsentrasi zat pada fasa gas dengan fasa cair. Absorpsi dapat terjadi dengan dua cara yaitu absorpsi fisika dan absorpsi kimia. Perbedaan kedua proses absorpsi tersebut terletak pada mekanisme perpindahan massa yang terjadi. Pada absorpsi kimia, proses perpindahan massa dilakukan melalui reaksi kimia. Kelebihan absorpsi fisika dibandingkan dengan absorpsi kimia terletak pada kemampuan pelarut untuk regenerasi. Pada absorpsi fisika, energi (panas) yang dibutuhkan untuk regenerasi relatif jauh lebih rendah dibandingkan absorpsi kimia. Hal ini disebabkan karena, pada absorpsi fisika regenerasi larutan tidak perlu dilakukan dengan penambahan energi, cukup menurunkan tekanan sebagai gaya pendorong (driving force). Proses operasional kontaktor membran gas-cair berbeda dengan proses membran lainnya seperti filtrasi karena tidak terdapat aliran konveksi melewati pori, tetapi hanya perpindahan secara difusi dari beberapa komponen. Hal tersebut merupakan alasan utama mengenai karakteristik kontaktor membran gas-cair yang tidak terlalu sensitif terhadap pengotoran jika dibandingkan membran konvensional.

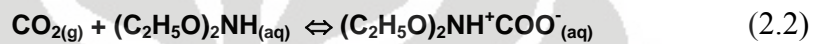
Proses absorpsi CO₂ oleh air merupakan absorpsi secara fisika yaitu CO₂ akan berpindah dengan cara berdifusi tanpa terjadinya reaksi kimia. Namun, pada dasarnya CO₂ tetap bereaksi dengan air seperti mekanisme berikut.



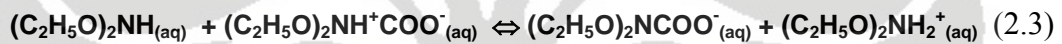
Reaksi CO₂ dengan air (H₂O) merupakan reaksi kesetimbangan, dimana konstanta kesetimbangan bernilai sangat kecil sehingga pembentukan ion H⁺ dan ion HCO₃⁻ juga bernilai sangat kecil. Oleh karena itu, absorpsi CO₂ oleh air lebih dinyatakan sebagai absorpsi fisika dengan mengabaikan reaksi kimia yang ada

Absorpsi gas karbondioksida dengan pelarut DEA ((C₂H₅O)₂NH) merupakan absorpsi kimia yang melibatkan reaksi antara CO₂ yang merupakan salah satu senyawa asam lemah dengan DEA (*Diethanolamine*) yang merupakan senyawa basa lemah. Mekanisme *Zwitterion* telah diterima secara umum sebagai mekanisme reaksi antara gas CO₂ dengan amina sekunder seperti DEA (Caplow,1968). Mekanisme reaksi dibagi kedalam dua langkah berikut (Zhang et.al, 2006).

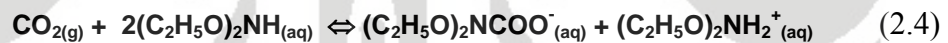
1. Pada langkah awal, CO₂ bereaksi dengan DEA membentuk ion Zwitterion yang merupakan ion transisi.



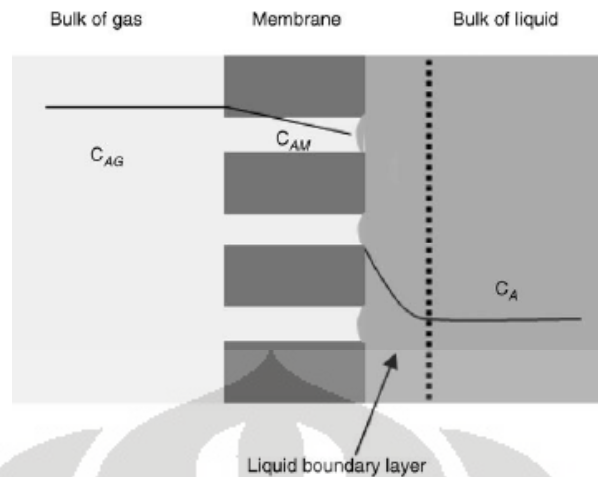
2. Selanjutnya, ion Zwitterion yang terbentuk akan bereaksi kembali dengan DEA membentuk ion karbamat yang mengandung CO₂.



Secara keseluruhan mekanisme reaksi antara CO₂ dengan DEA adalah sebagai berikut.



Persamaan reaksi tersebut menyatakan bahwa konsentrasi CO₂ yang terlarut merupakan setengah dari konsentrasi DEA yang bereaksi membentuk ion karbamat. Absorpsi CO₂ menggunakan membran didasarkan atas terjadinya kontak antara fasa gas dan cair melalui membran mikroporus yang hidrofobik. Membran ini membentuk penghalang antara fasa gas dan fasa cair yang dapat menimbulkan perpindahan massa antara dua fasa tanpa terjadinya dispersi antara satu fasa terhadap fasa yang lain. Fasa gas biasanya mengisi pori-pori membran dan mengalami kontak dengan fasa cair yang berada pada sisi lain dari membran. Fasa cair harus memiliki tekanan yang lebih besar dibandingkan dengan fasa gas untuk mencegah terjadinya dispersi gelembung-gelembung gas kedalam cairan



Gambar 2.1 Absorpsi CO₂ oleh suatu larutan melewati membran
 Sumber: (Zhang et.al, 2006)

Pada saat gas CO₂ mendekati interfasa cair, gas CO₂ akan larut dan bereaksi dengan DEA dan membentuk ion karbamat. Ion karbamat akan berdifusi ke dalam fasa cair sedangkan konsentrasi DEA pada interfasa cair akan turun karena bereaksi dengan gas CO₂. Hal ini menyebabkan terjadinya difusi pelarut DEA dari bulk cairan ke interfasa cair. Reaksi kimia yang terjadi sangat cepat akan menyebabkan DEA berdifusi dengan cepat sehingga gas CO₂ diperlukan untuk berdifusi terlebih dahulu melalui lapisan film cair sebelum dapat bereaksi dengan DEA. Oleh karena itu, daerah reaksi terdapat di antara lapisan tipis cairan dengan *bulk* cairan. Jadi, dapat disimpulkan bahwa DEA dalam proses absorpsi CO₂ memiliki peran untuk mempercepat laju difusi gas CO₂ dari interfase gas cair.

2.2. Pelarut Pada Absorpsi CO₂

Dalam proses absorpsi dikenal dua jenis pelarut, pelarut fisik dan pelarut kimia. Contoh pelarut fisik adalah air, propilen karbonat dan methanol sedangkan pelarut kimia seperti senyawa amina, alkali hidroksida, dan K₂CO₃. Selain itu saat ini tengah dikembangkan suatu pelarut yang berasal dari tanaman ataupun tumbuhan (*Green Solvent*).

2.2.1. Pelarut Senyawa Amina

Jenis pelarut ini merupakan pelarut yang paling *exist* atau paling banyak digunakan dalam industri pada proses absorpsi CO₂ melalui kolom konvensional

terutama pada industri pengolahan gas alam untuk proses pemisahan gas CO₂ (*gas sweetening process*). Senyawa gugus amina terdiri dari beberapa macam yaitu MEA, DEA, MDEA, dan AMP. Diantara jenis senyawa amina, MEA merupakan senyawa yang paling ekonomis dibandingkan senyawa yang lain. Namun, karena sifatnya yang korosif MEA jarang digunakan didalam industri dengan mempertimbangkan faktor umur kolom. Sementara DEA merupakan senyawa yang moderat, tidak terlalu korosif dan tidak terlalu mahal. Selain itu DEA memiliki tekanan uap yang cukup rendah sehingga penggunaan pelarut ini dapat dilakukan secara efektif. Diantara semua jenis senyawa amina MDEA paling banyak digunakan saat ini menggantikan senyawa MEA dan DEA yang dianggap merugikan karena bersifat korosif. Keunggulan MDEA ialah mudah diregenerasi sehingga dianggap ekonomis walaupun harganya paling mahal diantara senyawa sejenisnya. Sifat-sifat senyawa amina yang disampaikan tersebut hanya berlaku untuk absorpsi pada kolom konvensional. Sementara ini, dalam pengembangan membran sebagai kontaktor ditemukan bahwa AMP serta DEA merupakan senyawa yang paling efektif dalam menyerap CO₂ (Wang et.al, 2004).

Tabel 2.1 Perbandingan sifat-sifat karakteristik senyawa amina

Senyawa Amina	Tekanan Uap (20°C)	Kelarutan dalam air	Massa Jenis (Kg/m³)	Titik Didih (°C)
MEA	25 Pa	Tidak Larut	1012	170
DEA	0,01 Pa	Larut	1090	217
MDEA	1 Pa	Sangat Larut	1043	247

Sumber: www.wikipedia.org (diakses 20 Mei 2009)

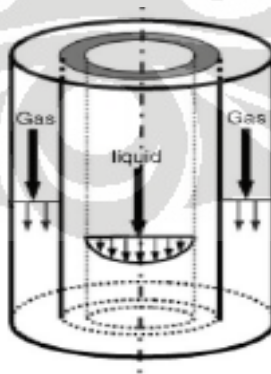
2.2.2. Pelarut Senyawa Alkali Hidroksida

Senyawa Alkali Hidroksida yang umum digunakan sebagai pelarut CO₂ antara lain NaOH. Senyawa ini telah diteliti selama bertahun-tahun sebagai pelarut pada proses absorpsi. Karakteristik senyawa ini antara lain merupakan senyawa basa kuat, keras, rapuh dan menunjukkan pecahan hablur. Bila dibiarkan di udara akan cepat menyerap karbondioksida dan lembab, mudah larut dalam air. Titik leleh 318°C serta titik didih 1390°C. Hidratnya mengandung 7; 5; 3,5; 3; 2 dan 1 molekul air (Daintith, 2005). NaOH membentuk basa kuat bila dilarutkan dalam air, NaOH murni merupakan padatan berwarna putih, densitas NaOH

adalah 2,1. Senyawa ini sangat mudah terionisasi membentuk ion natrium dan hidroksida (Keenan dkk., 1989). Senyawa ini cukup baik dalam menyerap CO₂ dibandingkan dengan air. Namun pada konsentrasi yang tinggi terkadang senyawa ini dapat merusak sifat morfologi suatu bahan sehingga hanya dapat digunakan pada konsentrasi yang rendah.

2.3. Teknologi Membran

Definisi membran secara umum adalah suatu penghalang selektif di antara dua fasa, dimana suatu spesies molekul dapat melalui membran sedangkan spesies molekul lainnya tidak. Hal tersebut disebabkan adanya perbedaan ukuran pori membran, sifat molekul tersebut, maupun sifat membran itu sendiri (Mulder, 2000). Laju perpindahan molekul pada membran ditentukan oleh permeabilitasnya di dalam membran dan dikarenakan adanya gaya pendorong (*driving force*) yang bekerja pada molekul tersebut. Gaya penggerak tersebut dapat berupa perbedaan tekanan, konsentrasi, temperatur di antara fluida pada membran, dan potensial listrik antara larutan pada bagian luar membran dengan larutan yang berada pada bagian dalam membran. Pada fasa cair, konsentrasi CO₂ terlarut akan mengalami penurunan yang signifikan karena adanya tahanan pada cairan. Pada membran dan fasa gas, penurunan konsentrasi CO₂ jauh lebih kecil dikarenakan pada membran terdapat dua tahanan yaitu tahanan gas yang berada di mulut pori membran dan tahanan membran itu sendiri sedangkan pada fasa gas terdapat tahanan pada fasa gas.



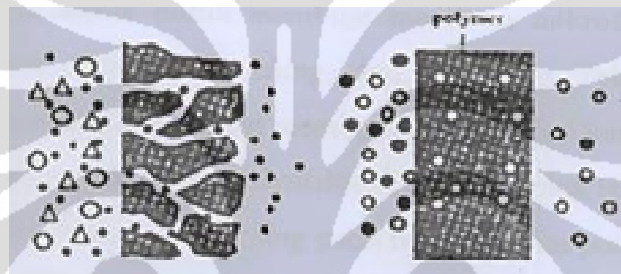
Gambar 2.2 Skema Aliran Fasa Gas dan Cair pada Membran

Sumber: Zhang et.al, 2006

Besarnya laju perpindahan massa yang akan dipisahkan sebanding dengan besarnya gaya penggerak yang ada. Permeabilitas membran ditentukan oleh konsentrasi dan mobilitas komponen dalam struktur membran. Ketebalan suatu membran juga sangat mempengaruhi tingkat permeabilitas membran. Semakin tebal membran maka tahanan terhadap perpindahan massanya semakin besar, sehingga laju permeasi yang diperoleh rendah.

2.4. Membran Berpori

Berdasarkan karakteristik dan selektivitasnya, membran dapat dibagi dua jenis yaitu membran berpori (*porous membrane*) dan membran tidak berpori (*dense membrane*), seperti pada gambar :



Gambar 2.3 Membran berpori dan membran tidak berpori

Pada membran berpori proses pemisahan berdasarkan pada perbedaan ukuran partikel. Sedangkan komponen penyusun membran hanya berpengaruh kecil pada proses separasi. Berdasarkan IUPAC, ukuran pori membran dapat dibagi menjadi tiga jenis, yaitu :

1. Mikropori : ukuran pori membran $< 2\text{nm}$
2. Mesopori : ukuran pori membran antara $2 - 50\text{ nm}$
3. Makropori : ukuran pori membran $> 50\text{ nm}$

Membran berpori biasanya digunakan pada proses mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi dan ukuran pori paling mempengaruhi selektivitas membran jenis ini. Selain hal itu, pemilihan jenis membran juga mempengaruhi peristiwa yang terjadi dalam membran seperti stabilitas kimia, adsorpsi, dan pembersihan membran. Persyaratan polimer yg akan digunakan ditentukan oleh fluks, selektivitas, sifat termal dan kima dari polimer tersebut. Permasalahan utama yang terjadi dalam penggunaan membran ini adalah karena adanya proses polarisasi konsentrasi dan

fouling. Oleh karena itu, faktor penting dalam pemilihan membran jenis ini yaitu kemudahan dalam mencegah *fouling* dan membersihkan membran setelah terjadi *fouling*. Selain hal itu, faktor lain yang turut berpengaruh ialah ketahanan membran dalam proses pemisahan campuran yang tidak saling larut pada tekan tinggi.

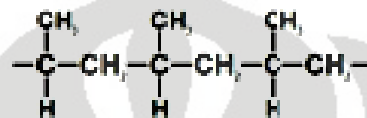
Material yang bersifat hidrofobik seperti PTEE, PVDF, dan isotaktik Polipropilen (PP) sering dibuat menjadi membran mikrofiltrasi. Membran mikrofiltrasi dari PTEE dapat dibuat melalui teknik *sintering* dan *stretching*, sedangkan membran PVDF dibuat melalui teknik inversi fasa. PTFE memiliki stabilitas termal dan kimia yang sangat baik, kristalinitas yang tinggi, dan tidak larut dalam pelarut biasa. PVDF juga memiliki stabilitas termal dan kimia yang baik walaupun tidak sebaik PTFE. PVDF larut dalam pelarut aprotik seperti Trietilfosfat (TEP), Dimetilformamida (DMF), dan Dimetil asetamida (DMAC).

Polipropilen (PP) dalam bentuk isotaktik memiliki sifat tahan terhadap pelarut. Konfigurasi isotaktik berbentuk kristal sedangkan konfigurasi staktik berbentuk amorf. Baik polimer PTFE, PVDF, dan PP memiliki sifat-sifat yang hampir sama. Ketiganya memiliki stabilitas termal dan kimia yang baik. Membran hidrofobik ini juga bisa dipakai pada proses distilasi membran karena membran ini tidak terbasahi oleh air atau cairan lain dengan tegangan permukaan yang tinggi.

Walau membran hidrofobik memiliki stabilitas termal dan kimia yang sangat baik, polimer hidrofobik stabil tetap menjadi pilihan yang baik sebagai material membran karena dapat menurunkan kecenderungan terjadinya adsorpsi. Adsorpsi zat terlarut menyebabkan penurunan laju alir fluks karena lapisan zat terlarut yang teradsorpsi sulit dihilangkan dengan metode pembersihan. Beberapa jenis membran hidrofobik telah banyak digunakan sebagai material membran seperti selulosa dan turunannya antara lain ester selulosa, termasuk selulosa asetat, selulosa triasetat, selulosa tripropionat, etil selulosa, selulosa nitrat, dan ester campuran seperti selulosa asetat-butirat. Selulosa dan turunannya tidak hanya digunakan pada proses mikrofiltrasi dan ultra filtrasi tetapi juga pada proses reverse osmosis, pemisahan gas, dan dialisis.

2.5. Membran Polipropilen

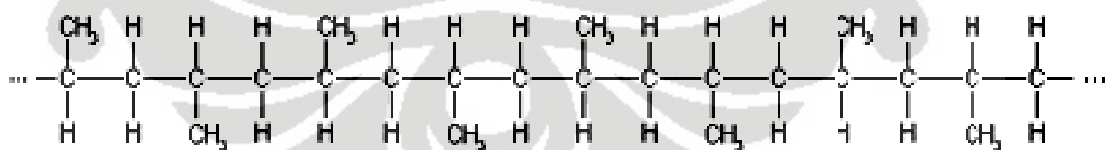
Pada penelitian kali ini membran yang digunakan adalah membran sintetik yang terbuat dari salah satu jenis polimer, yaitu polipropilen. Penggunaan polipropilen sebagai membran pada penelitian ini berdasarkan pada sifat hidrofobik yang dimilikinya sehingga air tidak bisa membasahi membran secara spontan (Mulder, 1997). Polipropilen memiliki titik leleh yang cukup tinggi, yaitu 160° C (320°F), yang menyebabkannya memiliki stabilitas termal yang baik.



Gambar 2.4 Struktur Kimia Polipropilen

Polipropilen merupakan salah satu senyawa *vinyl polymer*. Sebagian besar *vinyl polymer* dibentuk melalui polimerisasi Ziegler-Natta. Alasan digunakannya polimerisasi Ziegler-Natta dikarenakan pada polimerisasi radikal bebas, maka jenis polimer yang akan terbentuk ialah polipropilen ataktik. Sedangkan dengan menggunakan polimerisasi Ziegler-Natta menghasilkan polipropilen isotaktik. Sebagian besar polimer komersial yang ada di pasaran sekitar merupakan polimer isotaktik.

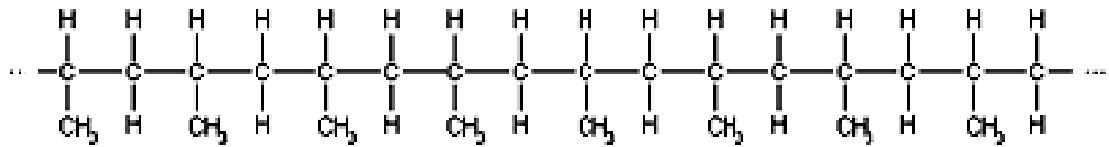
Polipropilen ataktik merupakan jenis polimer yang lemah karena polimer yang terbentuk merupakan bentuk amorf dengan susunan rantai yang tidak beraturan. Lain halnya dengan polipropilen isotaktik yang memiliki susunan rantai yang teratur, yaitu semua cabang metil terdapat pada sisi rantai yang sama.



Gambar 2.5 Struktur Molekul Polipropilen Ataktik

Polipropilen isotaktik memiliki karakteristik yang kuat dikarenakan memiliki bentuk kristal. Akan tetapi, gugus metil pada sisi samping polipropilen dapat mempengaruhi beberapa aspek kimia seperti karbon tersier yang menyebabkan polipropilen menjadi kurang stabil jika terdapat oksigen karena

mudah teroksidasi, sehingga perbedaan susunan rantai pada polipropilen akan mempengaruhi karakteristik dari polipropilen itu sendiri.



Gambar 2.6 Struktur Polipropilen Isotaktik

Sifat-sifat dari polipropilen isotaktik diantaranya:

1. Memiliki densitas yang lebih kecil ($0,9 \text{ gr/cm}^3$).
2. Mempunyai *softening point* yang lebih tinggi dan dapat dipakai pada suhu tinggi.
3. Polipropilen terhindar dari proses *cracking* oleh lingkungan, kecuali jika terdapat sulfur dan asam kromat.
4. Memiliki tingkat kekuatan yang tinggi.

2.6. Kontaktor Membran

Kontaktor membran efektif untuk memisahkan atau menambahkan gas ke dalam air. Dengan desain kontaktor yang baik maka koefisien perpindahan massa dapat dioptimalkan. Selain itu juga dapat menurunkan *pressure drop*. Fungsi utama dari kontaktor membran yaitu:

1. Membuat fasa gas-cair tidak bergerak di dalam permukaan *porous membrane* karena efek kombinasi tegangan permukaan dan adanya perbedaan tekanan.
2. Memperbesar luas permukaan kontak dengan membran yang sama sehingga perpindahan massanya menjadi besar.

Proses pemisahan ditentukan dari koefisien distribusi komponen dalam dua fasa. Peran membran disini hanyalah sebagai alat penghubung (kontaktor). Secara umum membran tidak meningkatkan perpindahan massa tapi meningkatkan luas area per volume. *Packed and tray column* diketahui memiliki luas area per volume sekitar $30\text{-}300 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Dengan menggunakan kontaktor membran, maka luas area per volumenya dapat mencapai $1600 - 6600 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Keuntungan lainn menggunakan kontaktor membran adalah dapat menghilangkan *flooding* dan *unloading* serta fasa yang terdispersi. Berbeda dengan sistem

separasi lainnya, kontaktor membran dapat memberikan perpindahan massa secara keseluruhan. Berikut merupakan perbandingan luas area permukaan kontak diantara teknologi absorpsi.

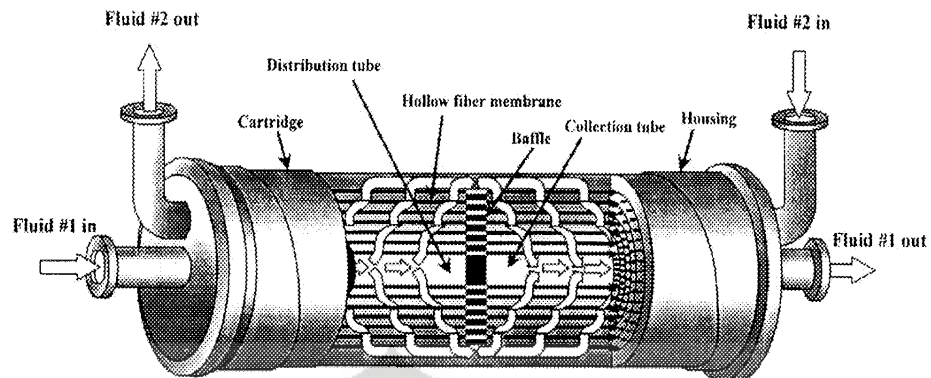
Specific Surface Area	
Contactora	Specific surface area (m ² /m ³)
Free dispersion column	1~10
Bubble column	
Packed column	100~800
Plate column	
Packed/trayed column	10~100
Mechanically agitated column	50~150
Membrane contactor	500~2000
Membrane contactor	1500~3000

Gambar 2.7 Perbandingan Luas Permukaan Spesifik diantara Teknologi Absorpsi

2.7 Kontaktor Membran Serat Berongga

Kontaktor membran serat berongga menggunakan membran serat berongga (*hollow fiber*) sebagai pemisah antar fasa yang satu dengan fasa yang lainnya. Struktur modul membran serat berongga mirip dengan modul kapiler tetapi yang berbeda adalah dimensinya. Struktur serat di dalam modul yang asimetrik memiliki diameter dalam sekitar 42 mikron (0.0016 inci) dan diameter luar sekitar 85 mikron (0.0033 inci). Jutaan serat ini akan dibentuk menjadi bundel dan dilipat setengah dengan konfigurasi kerapatan pengepakan yang paling tinggi mencapai 30000 m²/m³.

Distribusi air umpan berupa tabung plastik terperforasi (*perforated plastic tube*) dimasukkan ke dalam pusatnya untuk memperluas panjang keseluruhan dari benda. Kemudian bundel dibungkus dan kedua sisi ditutup sehingga membentuk lembaran. Modul membran serat berongga mempunyai diameter 10-20 cm (4-8 inci) yang terdapat dalam *shell* silinder dengan panjang kurang lebih 137 cm (54 cm) dan diameter 15-30 cm (6-12 inci). Keseluruhan proses penggabungan tersebut disebut sebagai permeator.



Gambar 2.8 Kontaktor membran serat berongga

Sumber: Gabelman dan Hwang, 1999

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

Fungsi utama membran dalam kontaktor membran serat berongga adalah untuk menciptakan luas permukaan kontak yang sangat besar di dalam modul sehingga proses perpindahan massa yang terjadi akan lebih efisien. Selain itu membran serat berongga juga digunakan untuk membuat fasa kontak gas cair pada pori membran tidak bergerak dengan kombinasi efek tegangan permukaan dan perbedaan tekanan pada tiap fasa.

Keuntungan kontaktor membran serat berongga sebagai kontaktor gas-cair dibandingkan dengan peralatan separasi konvensional antara lain yaitu (Gabelman dan Hwang, 1999):

1. Sistem kontak yang bersifat non-dispersif memudahkan kontrol terpisah dari laju alir fasa gas dan cairan.
2. Tidak diperlukan adanya perbedaan densitas antar fluida karena kontaktor membran dapat mengakomodir fluida dengan densitas yang sama dan sekaligus dapat dioperasikan pada berbagai orientasi (vertikal atau horizontal, baik searah maupun berlawanan arah).

3. Tidak terjadi pembentukan emulsi (*foaming*) karena tidak ada dispersi antar fluida.
4. Luas permukaan yang ada tidak mempengaruhi variasi laju alir (baik tinggi maupun rendah) karena kedua aliran tidak bergantung satu sama lain. Hal ini merupakan suatu kelebihan yang vital dalam proses industri ketika rasio pelarut terhadap umpan yang diperlukan sangat tinggi ataupun sangat rendah. Jika kondisi yang sama diterapkan dalam kolom ber-*packing* maka dapat terjadi *flooding* pada saat laju alir gas terlalu tinggi relatif terhadap laju alir air, sebaliknya bila laju alir gas terlalu rendah relatif terhadap laju alir air maka dapat terjadi *unloading*.
5. Efisiensi yang diperoleh lebih tinggi (dengan pengukuran *HTU-Height of Transfer Unit* yang rendah).
6. Luas permukaan kontak yang lebih besar daripada separasi konvensional, kira-kira dapat memberikan luas permukaan 30 kali lebih besar daripada *gas absorber* dan 500 kali lebih besar daripada kolom ekstraksi cair-cair.
7. Penskalaan hasil lebih linier sehingga peningkatan kapasitas dapat diprediksi secara sederhana dengan hanya menambahkan modul membran (dibatasi oleh spesifikasi peralatan pendukung seperti pompa transfer, perpipaan, dan lain-lain).
8. Tidak terjadi pemborosan pelarut sehingga efisien dan efektif dalam pemanfaatan pelarut.
9. Kontaktor membran juga dapat meningkatkan batas konversi kesetimbangan reaksi kimia dengan proses sirkulasi kandungan reaktor melalui kontaktor menggunakan pelarut ekstraksi atau gas desorpsi produk dapat diambil sehingga reaksi kesetimbangan akan bergeser ke arah kanan (produk).
10. Tidak memiliki bagian yang bergerak sehingga memudahkan perawatan dan pemeliharaannya.
11. Desain modularnya memperbolehkan pengaplikasian *plant* membran dalam lingkup kapasitas yang sangat luas. Baik kapasitas yang kecil

maupun besar dapat dicapai dengan mudah dengan menggunakan sedikit atau banyak modul membran.

12. Biaya perawatannya rendah jika dibandingkan dengan unit operasi lainnya.

Akan tetapi kontaktor membran serat berongga juga memiliki berbagai kelemahan, diantaranya (Gabelman dan Hwang, 1999):

1. Memiliki umur tertentu sehingga biaya periodik pergantian membran juga perlu diperhitungkan.
2. Untuk membran serat berongga jenis polimer, hanya dapat beroperasi pada rentang temperatur yang tidak terlalu tinggi karena dapat merusak membran. Selain itu juga tidak tahan terhadap kondisi yang terlalu asam atau basa.
3. Adanya penambahan tahanan membran pada perpindahan massa, akan tetapi tahanan ini tidak terlalu penting dan dapat dilakukan usaha untuk meminimalkan tahanan membran tersebut
4. Dapat terjadi *fouling* walaupun tidak sebesar pada kontaktor dengan *driving force* gradien tekanan. Tipe pengotor pada peristiwa *fouling* dapat dibedakan menjadi tiga (Mulder, 1997) :
 - a. Endapan organik (makromolekul, zat-zat biologis dan lain-lain)
 - b. Endapan anorganik (garam kalsium, hidroksi logam dan lain-lain)
 - c. Partikulat

Untuk mengatasi *fouling* pada membran dapat digunakan metode koagulasi dan *backwash*.

5. Efisiensinya berkurang karena adanya aliran *bypass* dalam *shell* (*shell-side bypassing*) sehingga ada sebagian fluida dalam *shell* yang tidak kontak dengan membran. Oleh karena itu aliran lebih baik dibuat menjadi turbulen.

2.8. Aplikasi Kontaktor Membran Serat Berongga

Secara umum aplikasi kontaktor membran serat berongga di industri dapat dikategorikan menjadi berbagai jenis proses seperti yang dijelaskan pada tabel di bawah ini:

Tabel 2.2 Aplikasi kontaktor membran serat berongga

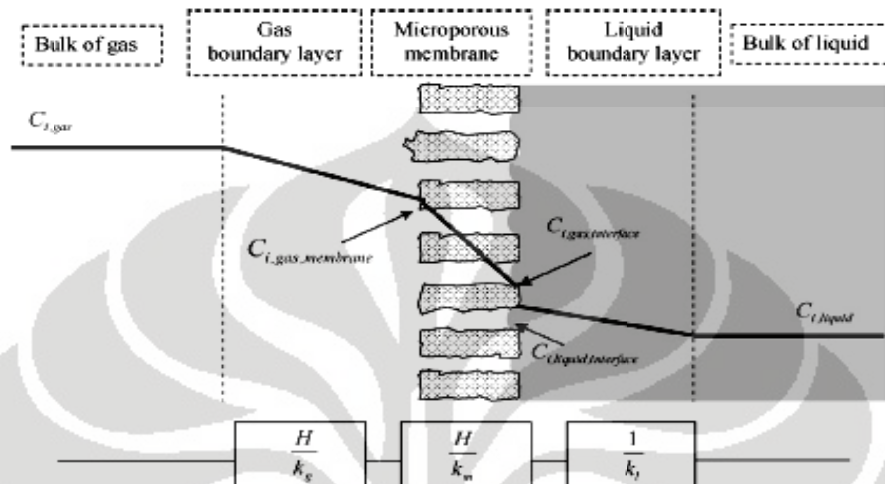
Aplikasi	Aliran Fluida	Bahan Membran	Laju Pengontrol Proses	Aplikasi di industri
Oksigenasi air	Selongsong: air Lumen: gas/udara	Port mikro — hidrofobik	Lapisan cairan	Pengolahan air limbah
Deoksigenasi air	Selongsong: air Lumen: nitrogen/vakum	Pori mikro — hidrofobik membran berat	Lapisan cairan	Pabrik Pembangkit tenaga, semikonduktor, makanan, farmasi.
Absorpsi gas	Selongsong: air/larutan encer Lumen: gas	Pori mikro — hidrofobik	Lapisan cairan	Pemisahan gas asam dan gas alam
Oksigenasi darah	Selongsong: darah Lumen: oksigen	Pori mikro – hidrofobik	Lapisan cairan	Dunia kedokteran
Bioreaktor membran untuk pengolahan limbah	Selongsong: air/desikan cair Lumen: gas/udara	Pori mikro — hidrofobik atau membran berat	Lapisan cairan	Pengolahan air limbah
Humidifikasi / dehumidifikasi udara	Selongsong: air Lumen: udara	Pori mikro — hidrofobik	Lapisan cairan dan tahanan membran	—

Sumber: Sutrasno Kartohardjono, 2004

2.9. Studi Perpindahan Massa Kontaktor Membran Serat Berongga

Perpindahan molekul karbondioksida ke dalam pelarut pada penelitian ini dipengaruhi oleh koefisien perpindahan massa dan gaya penggerak (*driving force*) dari perpindahan massa ini. Sedangkan perpindahan massanya ditentukan oleh proses yang berlangsung pada ketiga fasa di bawah ini yaitu (Feron dan Jansen, 2001):

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



Gambar 2.9 Perpindahan Massa pada Membran

Sumber: Atcharyawut et.al, 2007

Aliran pada fasa gas pada penelitian ini berupa gas CO₂ murni sehingga lapisan batas pada fasa gas dapat diabaikan. Selain itu membran yang digunakan dalam penelitian ini bersifat hidrofobik, yang berarti pori-pori membran hanya akan terisi oleh gas sehingga tahanan gas pada membran untuk perpindahan gas juga dapat diabaikan. Dengan memperhatikan hal tersebut maka tahanan utama perpindahan massa hanya berada pada fasa cair. Selanjutnya koefisien perpindahan massa dapat dihitung dari koefisien perpindahan massa fasa cair dan sifatnya tidak bergantung terhadap laju alir gas. Pada kontaktor membran gas-cair, selama pori membran terisi oleh gas, maka koefisien perpindahan massa *overall* hanya akan bergantung pada koefisien perpindahan massa fasa cair. Pada penelitian ini, prinsip metode yang digunakan untuk mengetahui perpindahan massa yang terjadi dalam proses absorpsi gas-cair adalah dengan mengamati perbedaan konsentrasi sampel sebelum dan sesudah melewati modul. Metode ini dapat digunakan ketika umpan mengalir baik di dalam maupun di luar serat.

Neraca massa pada absorpsi gas-cair di dalam modul secara diferensial adalah sebagai berikut:

$$-Q_G dC_G = Q_L dC = K_L(C^* - C)dA \quad (2.5)$$

Dimana,

Q_G = laju alir volumetrik pada fasa gas

C_G = konsentrasi dalam fasa gas.

Menurut hukum Henry:

$$C_G = HC^* \quad (2.6)$$

Dimana,

C^* = konsentrasi CO_2 dalam kesetimbangan di dalam modul.

Dari kedua persamaan di atas, maka dapat ditentukan gaya penggerak *overall* yang melewati membran untuk proses perpindahan massa CO_2 secara diferensial sebagai berikut:

$$d(C^* - C) = dC^* - dC = -\left(1 - \frac{dC^*}{dC}\right) dC \quad (2.7)$$

$$d(C^* - C) = -\left(1 - \frac{Q_L}{Q_G H}\right) dC = -H' dC \quad (2.8)$$

Dimana,

H' = konstanta tidak berdimensi Yang-Cussler.

Dengan mensubstitusikan dC dari persamaan (2.8) ke persamaan (2.5) akan didapat persamaan:

$$\frac{d(C^* - C)}{C^* - C} = -\frac{K_L H' A}{Q_L} \quad (2.9)$$

Selanjutnya persamaan (2.4) diintegrasikan dengan kondisi batas:

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

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

sehingga,

$$\ln \frac{(C_1^* - C_1)}{C_0^* - C_0} = -\frac{K_L H' A}{Q_L} \quad (2.10)$$

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

Konstanta Yang-Cussler dirumuskan sebagai berikut:

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

Konstanta Yang-Cussler dapat diabaikan jika laju alir volumetrik fasa gas dikalikan dengan konstanta hukum Henry untuk CO₂-H₂O (291 K dan 100 kPa) jauh lebih besar daripada laju alir volumetrik fasa cair ($Q_G H \gg Q_L$). Oleh karena itu penurunan konsentrasi CO₂ dalam fasa gas sepanjang modul dapat diabaikan sehingga $dC^* \approx 0$, maka:

$$C_0^* = C_1^* = C^*$$

Dari kondisi ini maka koefisien perpindahan massa overall dapat diperoleh dari persamaan (2.5) yang diubah bentuknya menjadi:

$$K_L = \frac{Q_L}{A} \ln \frac{(C^* - C_0)}{(C^* - C_1)} \quad (2.12)$$

C^* pada persamaan (2.7) merupakan konsentrasi CO₂ yang berada pada kondisi kesetimbangan. Nilai C^* dapat diperoleh dari hukum Henry sebagai fungsi suhu, yaitu:

$$k_H = k_H^0 \cdot \exp \left(-\frac{\Delta_{so} \ln H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^0} \right) \right) \quad (2.13)$$

k_H^0 adalah koefisien konsentrasi awal Henry yang memiliki nilai konstanta 0,036 mol dan juga merupakan konstanta Henry itu sendiri, yaitu $\frac{\Delta_{so} \ln H}{R} = 2200$, sehingga persamaan (2.13) dapat disederhanakan menjadi:

$$k_H = 0,036 \cdot \exp \left(-2200 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^0} \right) \right) \quad (2.14)$$

Untuk menghitung fluks karbondioksida yang mengalir maka digunakan persamaan berikut:

$$J = K_L \Delta C_M \quad (2.15)$$

Dimana,

ΔC_M = gaya penggerak pada perpindahan karbondioksida.

Gaya penggerak ini merupakan perbedaan konsentrasi karbondioksida sebelum dan sesudah memasuki modul.

Koefisien perpindahan massa umum dinyatakan dalam bentuk korelasi perpindahan massa. Dalam aliran fluida serat berongga, bentuk korelasi perpindahan massa ditunjukkan dalam persamaan berikut:

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

Dimana,

Sh = bilangan Sherwood

Re = bilangan Reynold

Sc = bilangan Schmidt.

Bilangan tak berdimensi tersebut dirumuskan sebagai berikut:

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

$$Re = \frac{vd_e}{\nu} \quad (2.18)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (2.19)$$

Dimana,

k_l = koefisien perpindahan massa fasa cair

d_e = diameter ekivalen

D = difusivitas CO₂ pada fasa cair

V = viskositas kinematik fasa cair

Untuk aliran fluida di dalam dan di luar membran, faktor yang perlu diperhatikan adalah faktor kekosongan (*void fraction*, ε), yang merupakan perbandingan volume kosong terhadap volume total ruang perpindahan massa (volume serat ditambah volume kosong).

$$\varepsilon = 1 - N_{fibres} \left(\frac{d_{o,fibre}}{D_{i,modul}} \right)^2 \quad (2.20)$$

Dimana,.

$d_{o,fibre}$ = diameter serat

$D_{i,modul}$ = diameter selongsong modul

N_{fibres} = jumlah serat di dalam modul

Laju alir yang mengalir pada bagian selongsong di sekitar serat dapat dianggap sama dengan laju alir yang mengalir pada bagian selongsong yang diakibatkan oleh dua silinder konsentris yang juga memiliki $d_{o,\text{fibre}}$ dan $d_{\text{ekuivalen}}$.

Diameter ekivalen ini dihitung dari persamaan:

$$d_{\text{ekuivalen}} = \frac{d_{o,\text{fibre}}}{\sqrt{1-\varepsilon}} \quad (2.21)$$

2.10. Studi Hidrodinamika Kontaktor Membran Serat Berongga

Hidrodinamika adalah pembelajaran mengenai sifat atau kondisi fluida saat fluida tersebut bergerak. Pada penelitian kali ini kinerja dari membran dipengaruhi oleh faktor-faktor yang berhubungan dengan hidrodinamika, yaitu faktor friksi, penurunan tekanan dan bilangan Reynold.

Pada fluida yang mengalir melalui saluran yang terisi penuh, gaya-gaya yang paling berpengaruh adalah gaya inersia dan gaya viskositas. Perbandingan antara gaya inersia dengan gaya viskositas ini disebut dengan bilangan Reynold sebagai berikut:

$$Re = \frac{de \cdot \rho \cdot v}{\mu} \quad (2.22)$$

Dimana:

de = diameter ekivalen

ρ = densitas

v = kecepatan aliran

μ = viskositas.

Studi ini mempelajari hubungan dan karakteristik antara bilangan Reynolds terhadap faktor friksi (f) dan *pressure drop* (ΔP). Faktor friksi merupakan koefisien yang tidak memiliki satuan yang berhubungan dengan kemampuan suatu fluida untuk menimbulkan gesekan (friksi). Faktor ini menjelaskan perpindahan aliran fluida pada membran yang didefinisikan secara berbeda dengan koefisien perpindahan massa. Persamaan faktor friksi Fanning adalah sebagai berikut :

$$f = \frac{d_e \cdot \Delta P}{4 \cdot L_f \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \rho \cdot v^2} \quad (2.23)$$

Menurut literatur, faktor friksi untuk aliran laminar ($Re < 4000$) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (2.24)$$

Sedangkan untuk aliran turbulen ($4000 < Re < 100000$), persamaan faktor friksi yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$f = \frac{0.0396}{Re^{(1/4)}} \quad (2.25)$$

Perpindahan momentum dapat dijelaskan dari faktor friksi (f) yang didefinisikan secara berbeda untuk koefisien perpindahan massa. Persamaan yang digunakan adalah:

$$F = A_w (0.5 \cdot \rho \cdot v^2) f \quad (2.26)$$

Dimana:

F = gaya friksi

A_w = luas permukaan yang terbasahi dan ρ adalah densitas fluida.

Selanjutnya, diameter ekivalen dapat dihitung dari persamaan :

$$d_e = \frac{d_p^2 - N \cdot d_f^2}{d_p + N \cdot d_f} \quad (2.27)$$

Dimana:

N = jumlah serat dalam modul

d_f = diameter serat

d_p = diameter selongsong (pipa)

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Pendahuluan

Proses absorpsi karbondioksida dengan menggunakan pelarut *Diethanolamine* (DEA) bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas kontaktor membran serat berongga sebagai media kontak. Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari perpindahan massa yang terjadi pada membran dan studi hidrodinamika dalam rangka mengevaluasi efektivitas kinerja kontaktor membran serat berongga. Penelitian dilakukan di Laboratorium Intensifikasi Proses lantai 2, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

3.2. Metode Penelitian

Secara keseluruhan penelitian akan dilakukan dalam empat tahap utama yaitu studi literatur, pembuatan modul, penyusunan alat, serta uji perpindahan massa dan hidrodinamika. Tahapan-tahapan tersebut akan digambarkan dalam diagram alir penelitian. Dimulai dari studi literatur dan diakhiri dengan pengolahan data dan analisis.

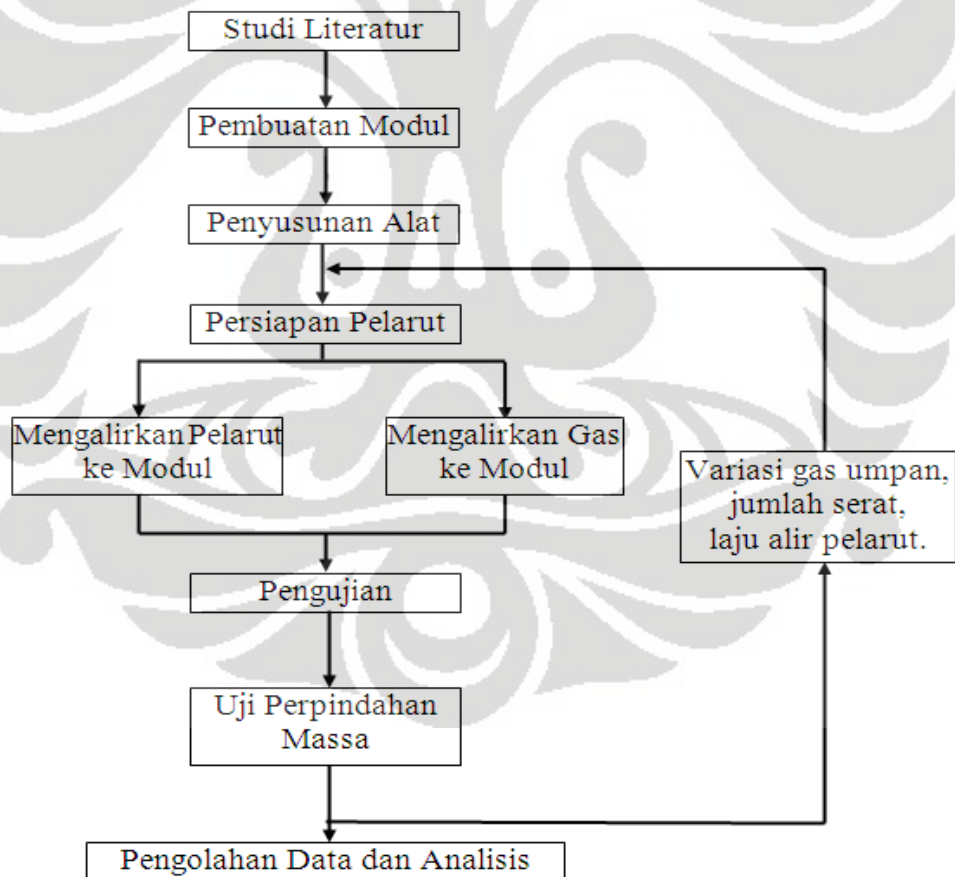
3.2.1. Diagram Alir Penelitian

Tahapan studi literatur dilakukan dengan mempelajari literatur-literatur yang berhubungan dengan topik penelitian dan bahan literatur pendukung lainnya seperti penelitian-penelitian yang terdahulu dikumpulkan dan dirangkum sehingga dapat dijadikan sebagai landasan penelitian kedepannya. Sumber utama literatur berasal dari jurnal-jurnal ilmiah dan skripsi peneliti terdahulu baik dari dalam negeri maupun luar negeri. Dilanjutkan dengan pembuatan modul dengan variasi jumlah serat sebesar 10,15, dan 20 yang akan menjadi kontaktor antara CO₂ dengan pelarut berupa air dan DEA. Setelah itu menyiapkan pelarut berupa air yang diperoleh dari air pompa dengan menyeleksi dan memastikan agar pH air tetap netral (pH=7). Air yang disiapkan selanjutnya dimasukkan ke dalam reservoir. Kemudian gas CO₂ dialirkan dengan tekanan tertentu yang diatur menggunakan regulator gas dan menunggu hingga keadaan stabil.



Gambar 3.1 Kontaktor membran serat berongga

Pelarut dialirkan dengan menjalankan pompa dan flowmeter. Setelah menunggu sampai kondisi tunak, sampel diambil untuk setiap variasi laju alir, yaitu 100, 150, 200, 250, dan 300 liter/jam. Pengambilan data dilakukan untuk pH, suhu sampel, laju alir sampel, dan beda tekanan sampel-pelarut. Berikut merupakan skema dari penelitian ini.



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

Kemudian data dicatat untuk pengolahan data serta analisa studi perpindahan massa. dan studi hidrodinamika. Prosedur ini dilakukan untuk setiap variasi jumlah serat. Prosedur tersebut kemudian diulang untuk pelarut DEA. Langkah awal adalah dengan menyiapkan larutan DEA yang dilakukan dengan cara pengenceran 1 liter DEA 98%. Reservoir dibersihkan dan semua air yang terjebak dalam pipa dibersihkan kemudian DEA dimasukkan ke dalam reservoir.

3.2.2. Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini:

- a. Kontaktor membran serat berongga
- b. Tangki reservoir air sebagai wadah bagi pelarut
- c. Pompa sentrifugal, dengan spesifikasi

- kecepatan putar: 2900 rpm	- H max	: 40-42 m
- Q min : 40 L/min	- Op. Volt	: 220 volt
- Q max : 45 L/min	- P	: 100 Wat

 digunakan untuk mengalirkan air dari reservoir menuju modul membran
- d. Rotameter, dengan rentang laju alir 100-1000 L/hr, skala 1 – 100; untuk mengukur laju sirkulasi air
- e. Needle valve untuk mengontrol laju alir gas CO₂ atau campuran gas CO₂/CH₄
- f. pH meter untuk mengukur pH larutan
- g. Mass Flow Meter untuk mengukur besarnya laju alir gas
- h. Liquid Flow meter untuk mengukur besarnya laju alir pelarut

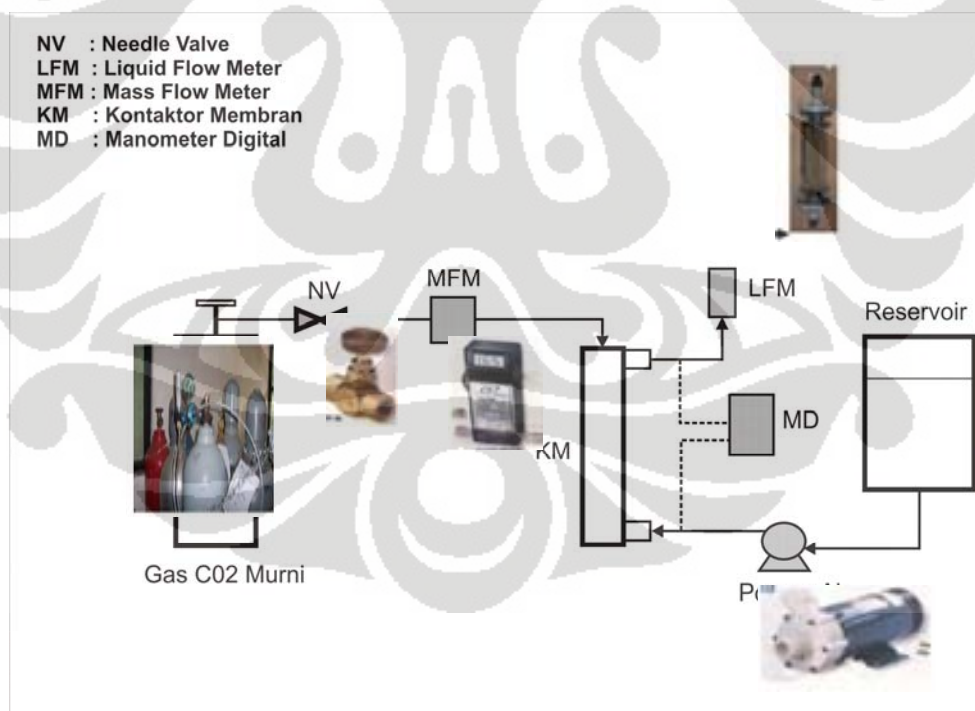
Sementara bahan-bahan yang digunakan untuk penelitian ini antara lain :

- a. Membran serat berongga propilen, MEMCOR CMF-S S10T oleh MEMCOR Australia; sebagai komponen utama dalam pembuatan modul
- b. Pipa akrilik (*flexi glass*); sebagai selongsong kontaktor membran
- c. Pipa PVC, sebagai penghubung antara tangki air dengan kontaktor membran sehingga air mengalir melalui pipa ini
- d. Lem Epoksi Araldite, sebagai perekat pada pembuatan modul membran
- e. Gas CO₂, diproduksi oleh "Industrial Gases Indonesia" kemurnian 95%

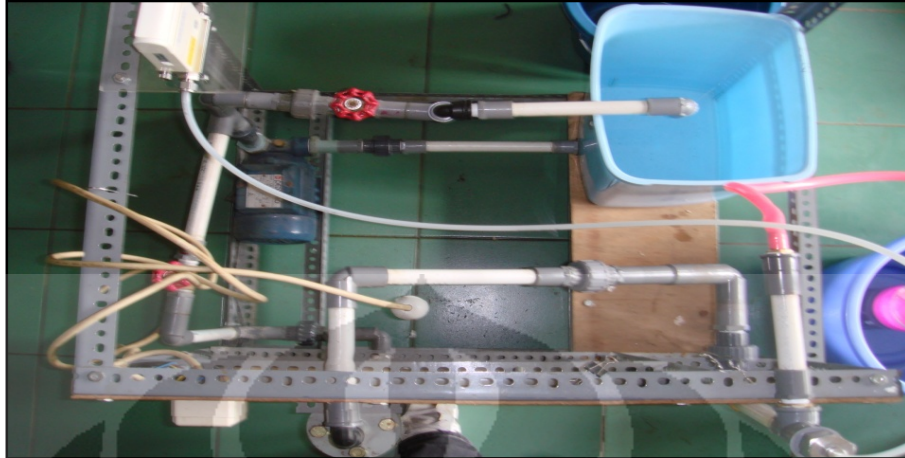
- f. Gas CO₂/CH₄ dengan persen konsentrasi 31% CO₂ dan 69% CH₄
- g. Larutan *Diethanolamine* (DEA) 98% Mercks-Schuchardt
- h. Air dengan pH netral

3.3. Skema Alat

Skema rancangan alat untuk penelitian ini secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 3.2. Umpan fasa gas mengalir dari tabung gas CO₂ dengan diatur menggunakan regulator gas. Kemudian umpan memasuki modul dan dibiarkan hingga kondisinya *steady*. Kemudian mengalirkan pelarut dari reservoir dengan bantuan pompa dan flow meter untuk mengatur laju alir. Aliran pelarut akan memasuki modul dan di dalam modul terjadi proses absorpsi CO₂ oleh pelarut. Aliran produk yang keluar dari modul kemudian diambil untuk dijadikan sampel dan selanjutnya melakukan pengambilan data berupa pengukuran konsentrasi dan temperatur dengan pHmeter serta perbedaan tekanan sebelum dan setelah melewati modul. Pengambilan data dilakukan untuk setiap variasi laju alir.



Gambar 3.3 Skema alat penelitian



Gambar 3.4 Rangkaian alat penelitian

3.4. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan melalui tahapan berikut ini:

1. Pembuatan Modul
Modul disusun berbentuk selongsong dan tabung dengan selongsong terbuat dari *acrylic* sedangkan tabung berupa serat yang direkatkan dengan lem epoksi
2. Menghubungkan peralatan berupa reservoir, pompa, flowmeter, modul, dan tabung CO₂
3. Menyiapkan air dan larutan DEA
4. Mengalirkan Gas CO₂ tanpa variasi tekanan dan menunggu hingga keadaan stabil
5. Mengalirkan pelarut dengan variasi laju alir dan menunggu hingga keadaan stabil
6. Pengambilan sampel untuk setiap variasi laju alir
7. Pengambilan data berupa pH dan suhu untuk tiap sampel
8. Menghitung dan mencatat beda tekanan yang tertera pada manometer digital
9. Mengulangi prosedur untuk setiap variasi konsentrasi pelarut dan jumlah serat modul.
10. Mengganti gas umpan menjadi CO₂/CH₄ hanya untuk jumlah serat modul sebanyak 10

11. Mengulangi prosedur 2 sampai 6 untuk umpan gas CO₂/CH₄
12. Mengambil data berupa pH, suhu dan sampel gas dengan menggunakan *gas trap*
13. Melakukan uji GC (*Gas Chromatography*) untuk sampel gas

3.5. Kondisi Operasi

Sistem berada pada kondisi batch, sebagai pelarut;

- Memvariasikan laju alir pelarut pada 100-350 liter/jam
- Pengambilan sampel dilakukan setelah sistem berada dalam kondisi tunak
- Pengambilan data berupa pH, suhu dan beda tekanan pada manometer

3.6. Pengolahan Data

3.6.1. Pengujian Perpindahan Massa

Koefisien Perpindahan Massa

Persamaan yang digunakan untuk memperoleh koefisien perpindahan massa pada proses absorpsi CO₂ ke dalam pelarut DEA adalah:

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

Sedangkan untuk memperoleh fluks karbondioksida yang melalui daerah interfasial dapat menggunakan persamaan:

$$J = K_L \Delta C_M \quad (3.2)$$

Korelasi Perpindahan Massa

Hubungan antara perpindahan massa dengan karakteristik hidrodinamika adalah dengan membuat besaran-besaran yang dapat mewakili hubungan tersebut dalam suatu persamaan. Besaran yang akan digunakan adalah bilangan Sherwood, bilangan Reynolds, dan bilangan Schmidt. Rumus ketiga bilangan tak berdimensi tersebut adalah:

$$Sh = k_l \frac{d_e}{D} \quad (3.3)$$

$$Re = \frac{\rho v d_e}{\mu} \quad (3.4)$$

$$Sc = \frac{v}{D} \quad (3.5)$$

Setelah memperoleh besaran tak berdimensi tersebut kemudian dihubungkan dalam suatu persamaan berikut:

$$Sh = aRe^b Sc^c \quad (3.6)$$

Persamaan (3.6) merupakan persamaan untuk menunjukkan hubungan koefisien perpindahan massa terhadap jenis aliran pada modul baik berupa laminar, transisi, maupun turbulen.

3.6.2. Pengujian Hidrodinamika

Penurunan tekanan dapat terjadi karena adanya friksi pada membran. Nilai friksi tersebut dapat diperoleh dan persamaan:

$$f = \frac{\varepsilon \cdot (D_o^2 - D_i^2) \cdot \Delta P}{4 \cdot d_o \cdot L_f \cdot \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot v^2} = \frac{d_e \cdot \Delta P}{2 \cdot L_f \cdot \rho \cdot v^2} \quad (3.7)$$

Nilai friksi yang akan dihitung terdiri dari:

1. Friksi modul nilai friksi ini diperoleh dengan menghitung nilai friksi pada tiap laju sirkulasi yang dilakukan.
2. Friksi literatur: nilai friksi ini diperoleh dan literatur pada laju alir yang digunakan pada penelitian.
3. Rasio friksi : nilai friksi ini diperoleh dan perbandingan antara nilai friksi modul hasil percobaan dengan nilai friksi literatur.

$$f_{ratio} = \frac{f_{modul}}{f_{literatur}} \quad (3.8)$$

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi efektifitas kinerja proses absorpsi CO₂ oleh pelarut DEA menggunakan media kontaktor membran serat berongga dapat ditinjau dari studi perpindahan massa dan hidrodinamika. Studi perpindahan massa dapat ditinjau dari profil nilai koefisien perpindahan massa serta fluks yang terjadi dengan melihat pengaruh variasi laju alir pelarut dan jumlah serat membran.

Studi hidrodinamika digunakan untuk melihat pengaruh jenis aliran terhadap efektifitas kinerja membran. Hal ini dapat dihubungkan dengan melihat pengaruh friksi yang ditimbulkan oleh aliran fluida terhadap kemampuan membrane dalam proses absorpsi CO₂. Faktor friksi ini berhubungan langsung dengan bilangan Reynold yang menyatakan jenis aliran.

4.1. Studi Perpindahan Massa

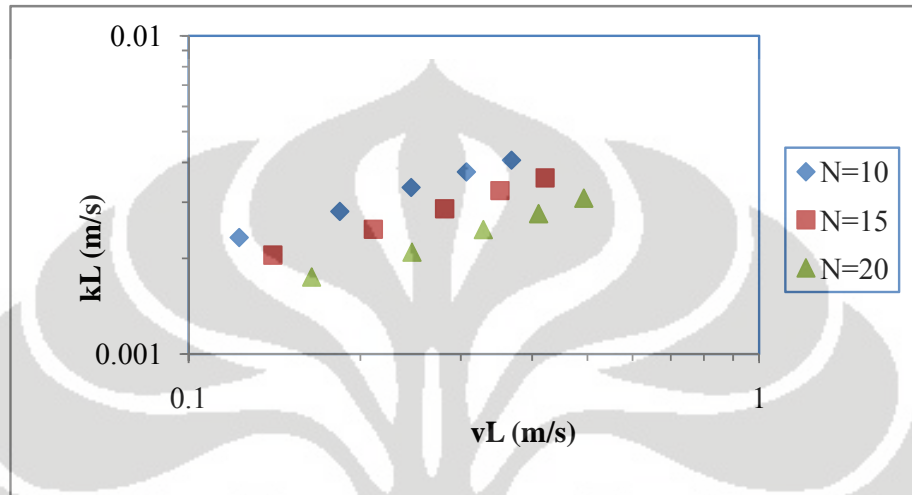
Pada proses absorpsi, studi perpindahan massa dapat ditinjau dari besaran koefisien perpindahan massa dan nilai fluks yang terjadi. Kedua besaran ini memperlihatkan perubahan konsentrasi pelarut sebelum dan setelah melewati modul yang telah dialiri gas CO₂. Pengambilan data ini dilakukan dengan mengambil sampel pada setiap variasi laju alir dan jumlah serat untuk selanjutnya diperoleh harga pH, temperatur, dan laju alir pelarut.

Korelasi perpindahan massa digunakan untuk mengetahui hubungan antara kecepatan dan jenis aliran yang melewati modul terhadap koefisien perpindahan massa yang dipengaruhi oleh geometri membran. Korelasi ini dapat ditunjukkan oleh bilangan tidak berdimensi Sherwood yang merupakan fungsi dari bilangan Reynolds. Bilangan Sherwood ini secara tidak langsung menghubungkan peristiwa hidrodinamika yang terjadi di dalam modul dengan proses perpindahan massa yang terjadi pada proses absorpsi.

4.1.1. Pengaruh Laju Alir Pelarut

Pada absorpsi CO₂ oleh pelarut DEA efektifitas proses dipengaruhi oleh perubahan laju alir pelarut. Hal ini berkaitan dengan dinamika fluida di dalam

modul yang akan mempengaruhi kinerja modul membran itu sendiri dalam interaksinya dengan pelarut. Pengaruh laju alir pelarut ini dapat dilihat melalui kecepatan linier. Hubungan koefisien perpindahan massa CO_2 terhadap kecepatan aliran cairan yang melalui kontaktor dapat dilihat pada 4.1 sebagai berikut.



Gambar 4.1 Variasi koefisien perpindahan massa terhadap kecepatan linier pelarut DEA untuk setiap modul

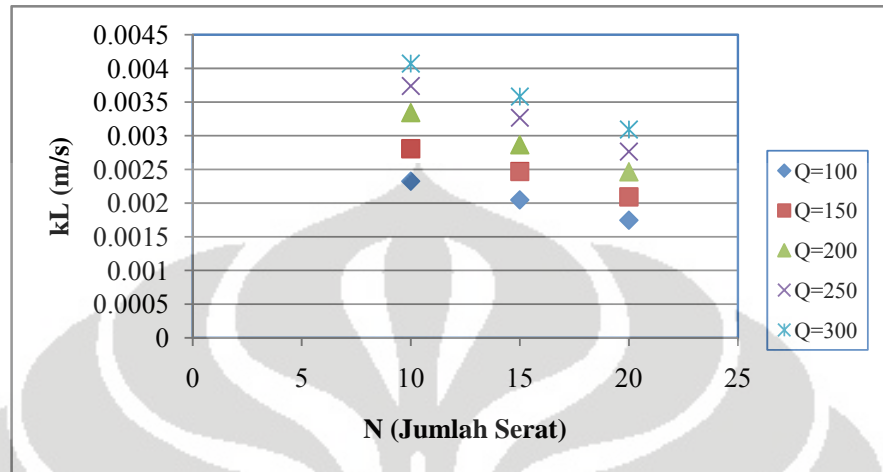
Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa koefisien perpindahan berbanding lurus dengan kecepatan linier pelarut yang mengalir di dalam kontaktor. Hal ini dikarenakan peningkatan kecepatan linier akan meningkatkan turbulensi aliran sehingga arus Eddy yang terjadi juga akan semakin besar. Arus Eddy ini akan memperkecil hambatan yang terjadi di sekitar aliran dan memperbesar koefisien perpindahan massa.

Peningkatan koefisien perpindahan massa dipengaruhi oleh fraksi kekosongan dan distribusi pelarut dalam modul. Semakin besar laju kecepatan aliran, maka fraksi kekosongan terpenuhi oleh pelarut sehingga distribusi pelarut menjadi merata dan kemampuan absorpsi menjadi meningkat, dengan demikian perpindahan massa akan menjadi tinggi.

4.1.2. Pengaruh Jumlah Serat

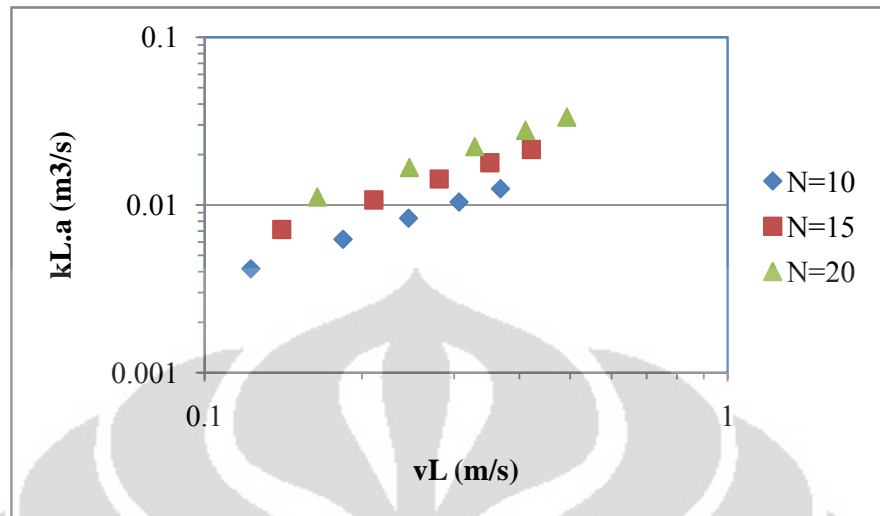
Pada penelitian ini penggunaan modul yang berbeda merupakan implementasi dari variasi jumlah serat. Tujuan dari variasi ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh jumlah serat terhadap efektifitas perpindahan massa pada

proses absorpsi dalam membran. Pengaruh tersebut dapat dilihat melalui Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2 Variasi jumlah serat modul terhadap koefisien perpindahan massa pada setiap laju alir pelaut DEA

Sesuai gambar grafik di atas terlihat bahwa koefisien perpindahan massa turun dengan naiknya jumlah serat didalam modul. Jumlah serat merupakan implementasi dari fraksi kepadatan membran sehingga dapat dinyatakan bahwa nilai koefisien perpindahan massa turun seiring dengan meningkatnya fraksi kepadatan membran. Semakin rendah fraksi kepadatan membran di dalam modul maka semakin baik kontak yang terjadi antara serat dengan air karena pergerakan serat di dalam modul juga semakin dinamis. Efek ini dikenal sebagai efek permukaan baru (*surface renewal effect*) yang dapat menyebabkan terjadinya peningkatan koefisien perpindahan massa di dalam modul kontaktor membran serat berongga (Lipnizki dan Field, 2001). Fenomena ini menjelaskan bahwa pada modul kontaktor dengan fraksi kepadatan rendah maka aliran *transversal* dan *surface renewal effect* lebih berpengaruh terhadap kemampuan perpindahan massa, sementara pada fraksi kepadatan membran yang tinggi efek channelling lebih berpengaruh karena adanya pengotor yang cukup besar pada pori-pori membran. Dengan demikian koefisien perpindahan massa CO_2 kedalam pelarut akan semakin kecil dengan bertambahnya jumlah serat di dalam modul. Pada sisi lain peningkatan jumlah serat akan meningkatkan luas permukaan aliran yang mempengaruhi nilai koefisien perpindahan massa sesuai gambar berikut.

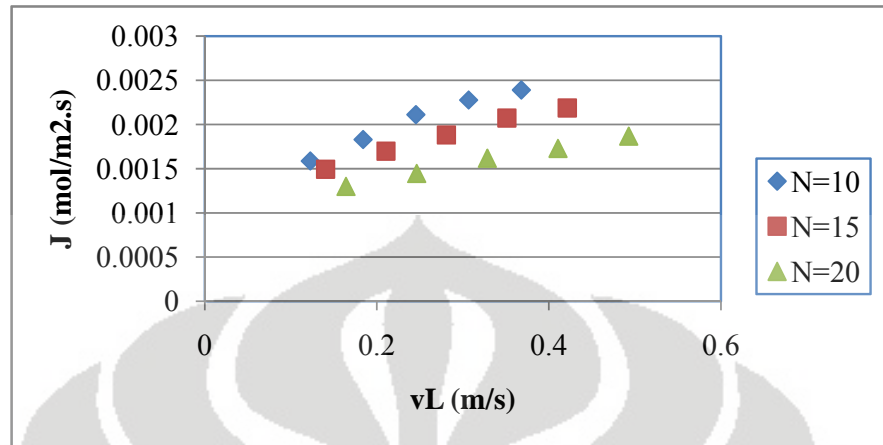


Gambar 4.3 Pengaruh luas permukaan aliran terhadap nilai koefisien perpindahan massa

Berdasarkan grafik dapat disimpulkan bahwa peningkatan luas permukaan aliran dapat menurunkan nilai koefisien perpindahan massa. Hal ini disebabkan oleh fraksi kekosongan yang terjadi karena peningkatan luas permukaan aliran. Ini mengindikasikan bahwa peningkatan jumlah serat yang direpresentasikan sebagai luas permukaan aliran dapat menurunkan nilai koefisien perpindahan massa. Selain itu, hal ini juga berhubungan dengan tahanan yang ada pada fasa gas, membran, dan fasa cair. Karbon dioksida yang digunakan merupakan CO₂ murni, sehingga tidak terdapat tahanan gas. Absorpsi yang terjadi juga merupakan reaksi kimia langsung antara CO₂ dan DEA, sehingga fasa cair tidak memiliki tahanan. Maka yang ada hanya tahanan membran. Tahanan membran berupa pembentukan lapisan film pada membran. Semakin banyak jumlah serat akan meningkatkan pembentukan lapisan film pada membran. Lapisan film terbentuk pada lapisan antarmuka gas-cair membran. Lapisan film ini dapat menghambat proses absorpsi. Sehingga proses perpindahan massa CO₂ yang melewati lapisan film ini akan terhambat dan mengakibatkan penurunan nilai koefisien perpindahan massa.

4.1.3. Fluks Perpindahan Massa

Fluks merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengevaluasi efektifitas perpindahan massa. Grafik berikut memberikan hubungan antara fluks dengan kecepatan aliran.



Gambar 4.4 Variasi Fluks terhadap kecepatan linier untuk pelarut DEA untuk setiap jumlah serat

Berdasarkan grafik tersebut terlihat bahwa kecepatan linier pelarut berbanding lurus dengan fluks CO_2 yang dihasilkan. Fluks menyatakan banyaknya CO_2 yang terabsorb oleh pelarut per satuan luas membran dan waktu. Kecepatan linier merupakan debit pelarut persatuan luas penampang membran. Semakin besar kecepatan linear DEA dalam selongsong maka semakin besar juga nilai fluksnya. Hal ini berarti banyak CO_2 yang terabsorb dipengaruhi oleh kecepatan linier pelarut seperti yang telah disampaikan sebelumnya. Nilai fluks dipengaruhi langsung oleh koefisien perpindahan massa sehingga besarnya nilai fluks akan dipengaruhi juga oleh arus Eddy. Semakin meningkat laju alir maka profil aliran menjadi semakin ke arah turbulen sehingga proses absorpsi terbantu oleh adanya arus Eddy. Oleh karena itu, semakin cepat aliran pelarut dalam membran semakin banyak CO_2 yang terserap.

4.1.4. Pengaruh Jenis Pelarut

Proses absorpsi pada dasarnya merupakan proses perpindahan massa antara komponen-komponen yang terlibat didalamnya, dalam hal ini pelarut air atau DEA dengan gas CO_2 . Daya penggerak dari proses absorpsi ialah perbedaan konsentrasi diantara komponen yang terlibat didalamnya. Proses absorpsi dapat terjadi secara fisika dan kimia. Penggunaan air sebagai pelarut memiliki tujuan untuk melihat efektifitas proses perpindahan massa secara fisika. Pada dasarnya

proses absorpsi CO₂ oleh air juga terjadi secara kimia, dimana pada reaksi ini akan menghasilkan H₂CO₃. Akan tetapi reaksi CO₂ dengan air (H₂O) merupakan reaksi kesetimbangan, dimana konstanta kesetimbangan bernilai sangat kecil sehingga pembentukan ion H⁺ dan ion HCO₃⁻ juga bernilai sangat kecil. Oleh karena itu, absorpsi CO₂ oleh air lebih dinyatakan sebagai absorpsi fisika dengan mengabaikan reaksi kimia yang ada.

Sementara penggunaan pelarut DEA bertujuan untuk mengevaluasi perpindahan massa pada proses absorpsi yang dominan secara kimia. Absorpsi gas CO₂ oleh pelarut DEA tidak hanya terjadi secara fisika, sebab CO₂ merupakan senyawa yang bersifat asam lemah dan DEA sendiri merupakan senyawa basa lemah sehingga proses perpindahan massa juga dipengaruhi oleh reaksi kimia yang terjadi yaitu reaksi asam-basa yang dapat mempercepat laju absorpsi. Pada penelitian ini konsentrasi pelarut DEA dibuat dalam konsentrasi yang rendah karena membran yang digunakan merupakan membran organik sintetik yang kurang stabil apabila dikontakan dengan larutan pekat atau larutan dengan konsentrasi tinggi. Absorpsi kimia yang terjadi antara DEA dengan CO₂ ditunjukkan dengan persamaan reaksi (2.1). Banyaknya CO₂ yang terserap diasumsikan sebanding dengan berkurangnya konsentrasi larutan DEA yang diakibatkan oleh reaksi pelarut tersebut dengan gas CO₂ itu sendiri. Terjadinya reaksi penggunaan larutan DEA dapat dibuktikan dengan teori persamaan yang dikembangkan oleh Qi dan Cusler (1985) sebagai berikut.

$$\frac{4.k.L}{d_f.v_L} > 1 \quad (4.1)$$

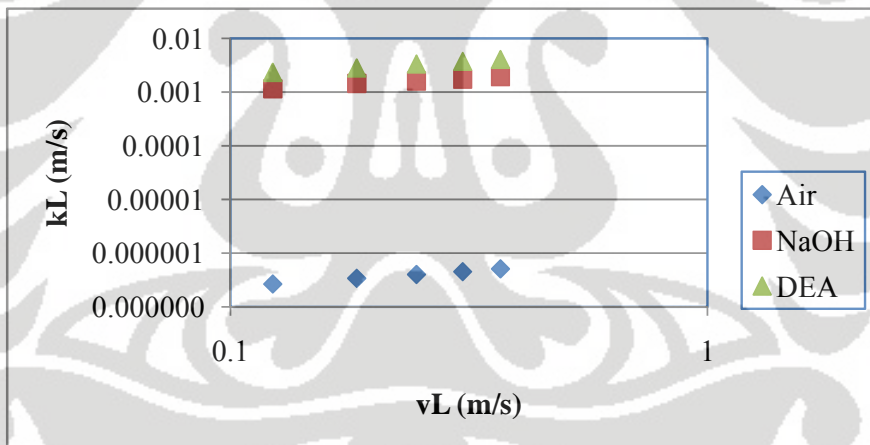
Persamaan tersebut dapat digunakan untuk membuktikan adanya faktor reaksi kimia pada absorpsi CO₂ oleh pelarut. Dari persamaan (4.1) diperoleh nilai faktor ini untuk pelarut DEA pada setiap kecepatan linear dan jumlah serat dengan rentang nilai dari 3.715806 sampai 11.22308. Hal ini membuktikan bahwa penggunaan larutan DEA pada absorpsi CO₂ melibatkan absorpsi kimia sehingga proses absorpsi lebih efektif akibat pengaruh reaksi kimia. Sedangkan untuk pelarut air, nilai faktor tersebut diperoleh dengan rentang 4.09566.10⁻⁵ sampai 0.001291 sehingga dapat disimpulkan bahwa reaksi kimia yang terjadi memiliki pengaruh yang sangat kecil pada proses absorpsi. Dengan demikian terbukti

bahwa pada absorpsi CO_2 oleh pelarut air terjadi hanya secara fisika dengan mengabaikan reaksi kimia. Selain itu, untuk konfigurasi modul dan kondisi yang sama penelitian telah dilakukan oleh Subihi (2007) menggunakan pelarut NaOH. Hasil yang diperoleh ditunjukkan oleh tabel berikut.

Tabel 4.1 Perbandingan Faktor Reaksi antara Air, NaOH dan DEA

Pelarut	Terendah	Tertinggi
Air	4.09566E-05	0.001291
NaOH	1.704985194	5.582445
DEA	3.715805906	11.22308

Pada tabel dapat dilihat bahwa DEA memiliki faktor reaksi yang paling tinggi dibandingkan pelarut lain. Hal ini menandakan bahwa reaksi kimia lebih efektif terjadi antara DEA dan CO_2 . Selain itu efektifitas DEA diperkuat oleh nilai koefisien perpindahan massa yang diperoleh dalam penelitian sesuai grafik berikut.



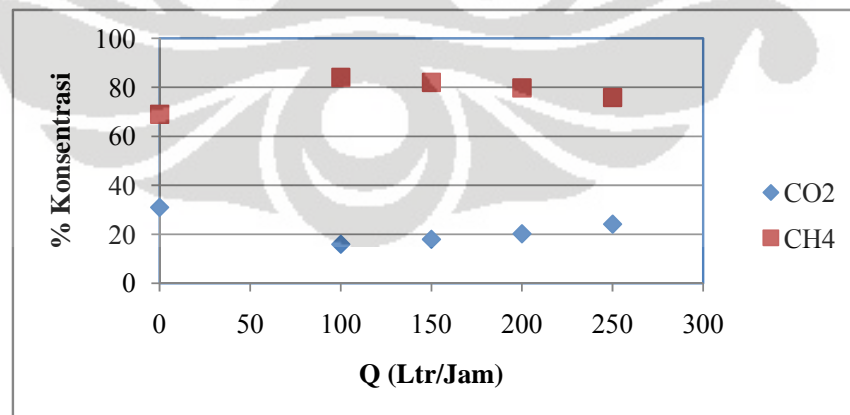
Gambar 4.5 Nilai koefisien perpindahan massa CO_2 dengan variasi kecepatan linier untuk setiap pelarut

Pada gambar grafik terlihat bahwa DEA memiliki nilai koefisien perpindahan massa yang paling baik dibanding kedua pelarut lainnya. Hal ini mengindikasikan reaksi antara CO_2 dengan DEA berjalan lebih efektif dibandingkan antara CO_2 dengan pelarut lainnya pada kondisi tersebut. Reaksi antara CO_2 dengan NaOH merupakan reaksi *irreversible* dimana peningkatan suhu akan meningkatkan proses reaksi antara keduanya (Li dan Chen 2004).

Reaksi tersebut dipengaruhi oleh ikatan ion yang terdapat pada NaOH sehingga memerlukan energi yang cukup besar untuk menguraikannya. Sementara ikatan yang terdapat pada DEA berupa ikatan kovalen sehingga hanya memerlukan energi yang relatif lebih sedikit untuk menguraikan komponennya.

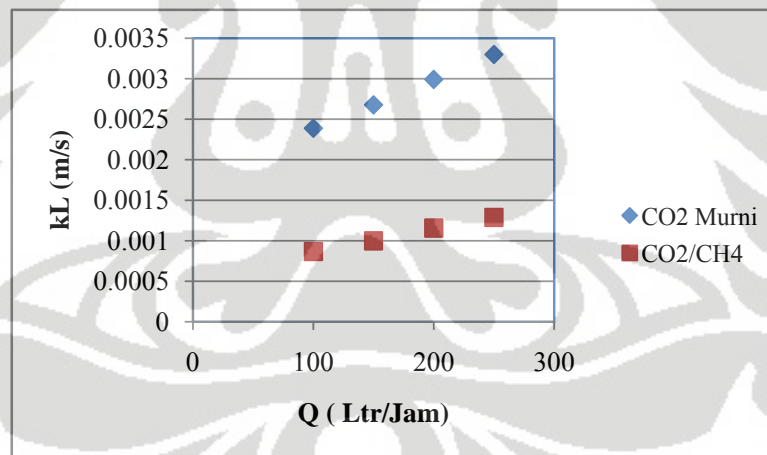
4.1.5. Pengaruh Jenis Gas Umpam

Fokus penelitian ini, terletak pada kemampuan membran sebagai kontaktor dalam proses absorpsi CO₂ dengan menggunakan pelarut DEA. Oleh karena itu, dalam penelitian ini gas CO₂ murni dipakai sebagai gas umpam agar hasil perpindahan massa yang diperoleh dapat maksimal sehingga besarnya kemampuan membran dalam proses ini dapat dievaluasi. Namun, pada penerapan yang lebih luas terutama di industri biasanya gas CO₂ yang perlu dihilangkan berada dalam bentuk campuran gas contohnya seperti gas alam. Untuk itu pada penelitian ini dilakukan juga proses absorpsi menggunakan campuran gas CO₂/CH₄ dengan tujuan membuktikan bahwa kontaktor membran serat berongga hanya *permeable* terhadap gas CO₂. Komposisi konsentrasi campuran gas umpam yang dipakai berupa 31% CO₂ dan 69% CH₄ untuk jumlah serat sebanyak 10. Data yang diperoleh berupa komposisi persentase akhir dari campuran atau komposisi campuran gas setelah melewati membran yang dilakukan dengan menggunakan analisa GC (*Gas Chromatography*) serta nilai pH dan suhu sampel. Permeabilitas membran terhadap gas CO₂ dapat diperlihatkan melalui grafik hasil penelitian berikut.



Gambar 4.6 Absorpsi CO₂ untuk umpam gas campuran CO₂/CH₄

Pada grafik, permeabilitas membran ditunjukkan oleh perubahan komposisi persentase campuran gas dari komposisi awal. Hasil yang diperoleh sesuai grafik diatas menunjukkan kontaktor membran dapat mengurangi persentase konsentrasi CO_2 hingga 15,9455%. Grafik tersebut memperlihatkan bahwa pengurangan persentase konsentrasi CO_2 dari persentase awal akan diikuti penambahan persentase konsentrasi CH_4 . Ini memberikan indikasi bahwa secara makro hanya gas CO_2 yang diserap dalam proses absorpsi menggunakan kontaktor membran dengan pelarut DEA, sementara gas yang lain akan dilewatkan. Hasil yang diperoleh pada persentase komposisi campuran gas menunjukkan bahwa secara kualitas pada laju alir yang lebih rendah akan diperoleh sampel yang lebih baik dalam menyerap CO_2 , namun bila dilihat secara kuantitas sampel lebih banyak mengandung CO_2 pada laju alir yang lebih tinggi. Ini dibuktikan dengan nilai koefisien perpindahan massa yang dihasilkan dari tiap-tiap laju alir pelarut. Nilai koefisien perpindahan massa memiliki kecenderungan yang sama baik pada absorpsi campuran gas CO_2/CH_4 maupun pada absorpsi gas CO_2 murni sesuai dengan grafik berikut.



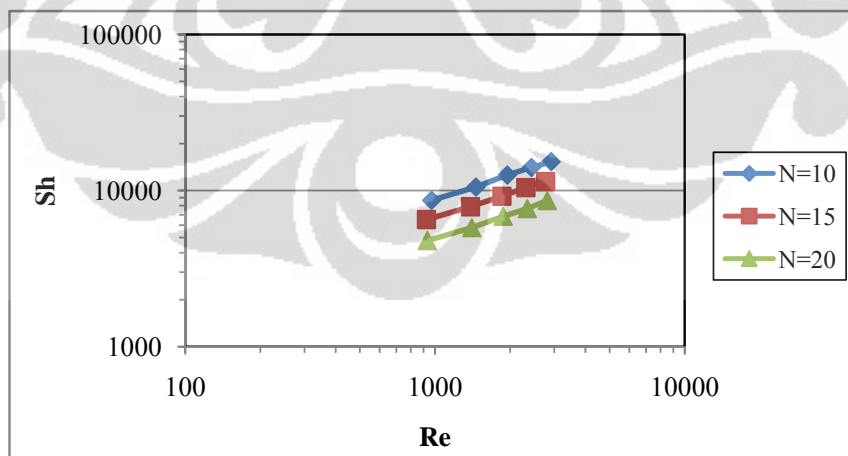
Gambar 4.7 Nilai koefisien perpindahan massa CO_2 dengan variasi laju alir pelarut DEA serta variasi umpan gas

Berdasarkan grafik diatas kenaikan laju alir pelarut akan diikuti oleh kenaikan koefisien perpindahan massa karena nilai variabel tersebut berbanding lurus dengan laju alir pelarut itu sendiri sesuai persamaan 2.12. Dari grafik terlihat bahwa proses absorpsi lebih efektif untuk CO_2 murni dibandingkan dengan campuran gas CO_2/CH_4 . Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan

kecenderungan tahanan perpindahan massa untuk berbagai umpan gas. Pada umpan gas CO_2 murni tahanan perpindahan bernilai sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Sementara untuk umpan campuran seperti CO_2/CH_4 , nilai tahanan perpindahan massa bernilai cukup signifikan menurunkan nilai koefisien perpindahan massa. Hasil yang diperoleh membuktikan bahwa kontaktor membran memiliki kinerja yang positif untuk berbagai jenis gas umpan pada proses absorpsi CO_2 menggunakan pelarut DEA.

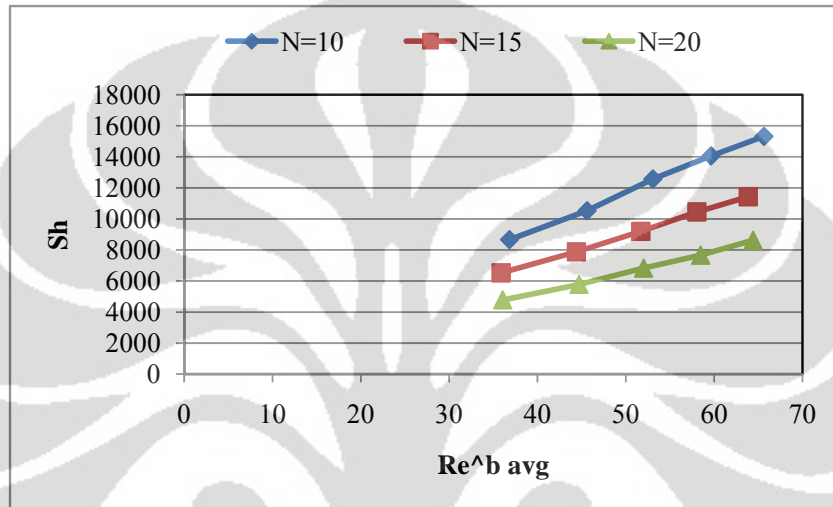
4.2. Korelasi Perpindahan Massa

Koefisien perpindahan massa dapat dihubungkan dengan pengaruh jenis aliran melalui suatu korelasi antara fungsi bilangan Sherwood (Sh) terhadap bilangan Reynold (Re). Bilangan Sherwood merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan besarnya koefisien perpindahan massa terhadap difusivitas CO_2 pada pelarut. Sementara bilangan Reynold merupakan bilangan yang menunjukkan jenis aliran. Korelasi perpindahan massa ini ditunjukkan dengan persamaan (3.7). Bilangan Sherwood dihitung dengan persamaan (2.17) yakni fungsi dari koefisien perpindahan massa, diameter equivalent, difusivitas CO_2 ke dalam pelarut. Bilangan Reynold dihitung dengan menggunakan persamaan (2.16) untuk setiap variasi laju alir dan jumlah serat. Kemudian Sh dan Re dihubungkan dengan menggunakan grafik pangkat (*Trendline Power*) untuk setiap laju alir dan jumlah serat seperti Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Perbandingan Bilangan Reynolds terhadap Sherwood pada variasi jumlah serat

Pada grafik tersebut diperoleh b (kemiringan) untuk setiap variasi jumlah serat dan selanjutnya nilai kemiringan tersebut dirata-rata. Kemiringan rata-rata grafik tersebut sebesar 0,52433 dan selanjutnya menjadi pangkat untuk bilangan reynold yang baru (Re^b). Kemudian nilai Re^b dihubungkan kembali dengan bilangan sherwood dalam suatu grafik garis lurus (*Trendline Linear*) sesuai dengan gambar berikut.



Gambar 4.9 Perbandingan Bilangan Reynolds^b terhadap Sherwood pada variasi jumlah serat

Pada grafik tersebut akan diperoleh nilai koefisien persamaan garis. Koefisien yang diperoleh selanjutnya dihubungkan dengan fraksi kepadatan membran. Bilangan Sherwood juga memiliki fungsi untuk menunjukkan hubungan geometri modul membran dengan aliran dalam modul. Hubungan tersebut dapat digambarkan oleh persamaan berikut.

$$Sh = f(\varphi) Re^b \quad (4.2)$$

Jenis geometri membran ditunjukkan oleh besarnya fraksi kerapatan membrane (φ). Fraksi kepadatan membran (φ) menunjukkan besarnya kerapatan pada membran sesuai dengan persamaan berikut.

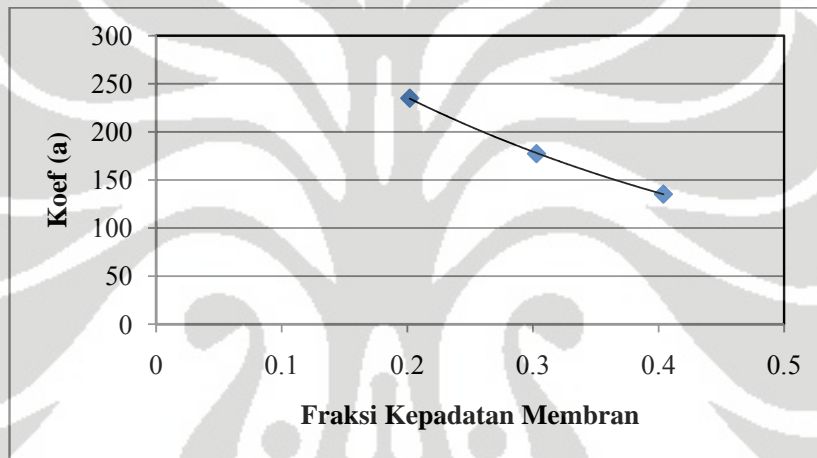
$$\varphi = N \left(\frac{df}{ds} \right)^2 \quad (4.3)$$

Hubungan nilai koefisien yang diperoleh dari grafik 4.9 dengan fraksi kerapatan membrane (φ) dapat ditampilkan dengan tabel berikut.

Tabel 4.2 Koefisien dan fraksi kepadatan membran untuk setiap modul

Modul	fraksi Kepadatan membran	koefisien (a)
N=10	1.421052632	2392
N=15	2.131578947	1447
N=20	2.842105263	1301

Selanjutnya berdasarkan data-data yang terdapat pada tabel dapat dibuat suatu hubungan antara koefisien (a) dengan fraksi kepadatan membran dengan menggunakan grafik eksponensial (Gambar) sehingga diperoleh persamaan yang selanjutnya digunakan untuk membuat korelasi antara Sh dan Re .

**Gambar 4.10** Hubungan nilai koefisien dengan fraksi kepadatan membran (φ)

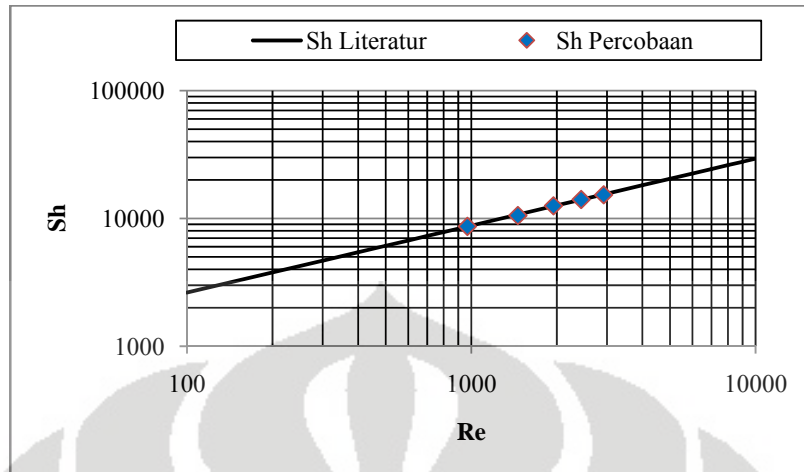
Berdasarkan grafik tersebut diperoleh persamaan yang menunjukkan hubungan antara geometri membran dengan jenis aliran yang terdapat dalam modul sebagai berikut.

$$f(\varphi) = 407,4 \cdot e^{-2,73x} \quad (4.4)$$

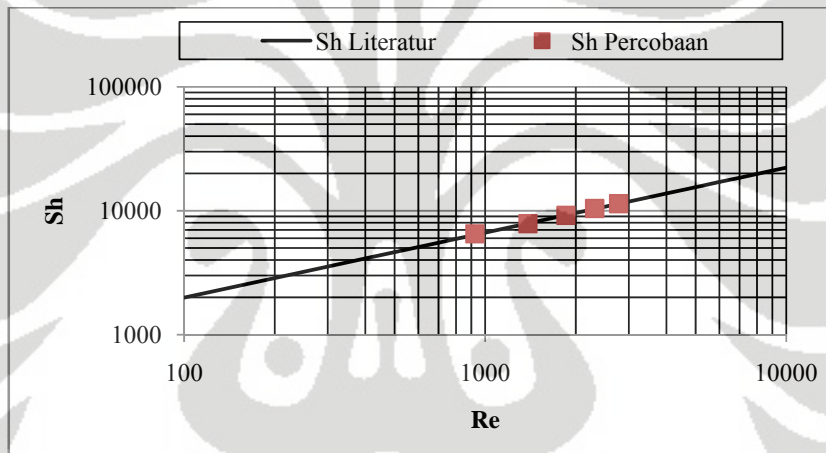
Dengan mensubstitusikan persamaan (4.3) ke dalam persamaan (4.1) akan diperoleh persamaan berikut.

$$Sh = 407,4 \cdot e^{-2,7x} Re^{0,52433} \quad (4.5)$$

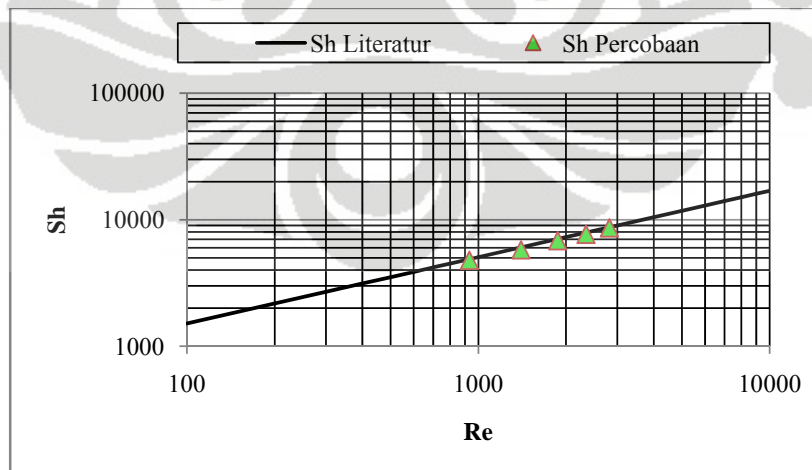
Sesuai persamaan 4.5 dibuat hubungan Re terhadap Sh untuk tiap modul. Gambar 4.11 hingga 4.12 menunjukkan hubungan antara geometris membran dengan jenis aliran di dalam modul tersebut.



Gambar 4.11 Hubungan Reynold terhadap Sherwood untuk jumlah serat sebanyak 10



Gambar 4.12. Hubungan Reynold terhadap Sherwood untuk jumlah serat sebanyak 15



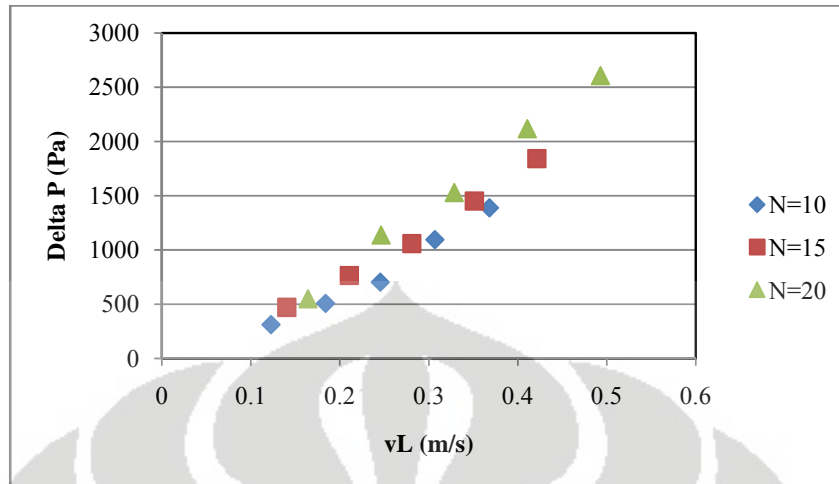
Gambar 4.13 Hubungan Reynold terhadap Sherwood untuk jumlah serat sebanyak 20

Berdasarkan Gambar 4.11, 4.12 dan 4.13 dapat disimpulkan bahwa bilangan Reynold berbanding lurus dengan bilangan Sherwood. Bilangan Reynold menunjukkan jenis aliran di dalam modul. Semakin tinggi bilangan Reynold maka aliran yang terjadi di dalam modul semakin ke arah turbulen. Bilangan Sherwood menggambarkan besarnya koefisien perpindahan massa yang terjadi. Semakin tinggi bilangan Sherwood maka menunjukkan semakin besar koefisien perpindahan massa yang terjadi. Berdasarkan hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa perpindahan massa lebih banyak terjadi dalam kondisi aliran yang semakin turbulen. Pada gambar grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa besarnya nilai bilangan Sherwood pada penelitian rata-rata terletak satu garis dengan persamaan bilangan Sherwood literatur. Hal ini berarti proses absorpsi gas CO₂ oleh pelarut DEA didalam membran berlangsung efektif.

Sesuai literatur, kondisi laminar terjadi untuk nilai pangkat Re (b) $\leq 0,5$ sedangkan nilai nilai pangkat Re yang berada antara 0,6-1,00 didominasi oleh aliran turbulen (Costello,1993). Nilai b yang diperoleh pada penelitian ini bernilai sekitar 0,52. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses perpindahan massa yang efektif terjadi pada kondisi turbulen.

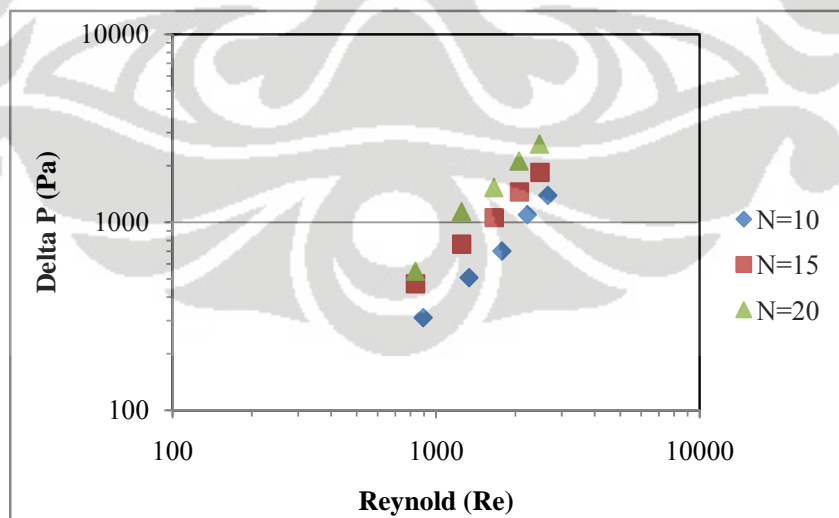
4.3. Studi Hidrodinamika

Secara garis besar proses absorpsi CO₂ oleh pelarut yang mengalir dalam suatu modul tidak lepas dari berbagai pengaruh hidrodinamika atau dinamika fluida. Faktor-faktor ini berkaitan dengan profil penurunan tekanan di dalam modul serta friksi (gesekan) yang ditimbulkan akibat gerakan fluida terhadap dinding modul atau serat. Pergerakan fluida tidak lepas dari profil aliran fluida itu sendiri yang ditunjukkan oleh bilangan Reynold. Dinamika fluida didalam membran berpengaruh terhadap kinerja membran tersebut. Friksi yang terjadi dapat menurunkan efektifitas kinerja membran.



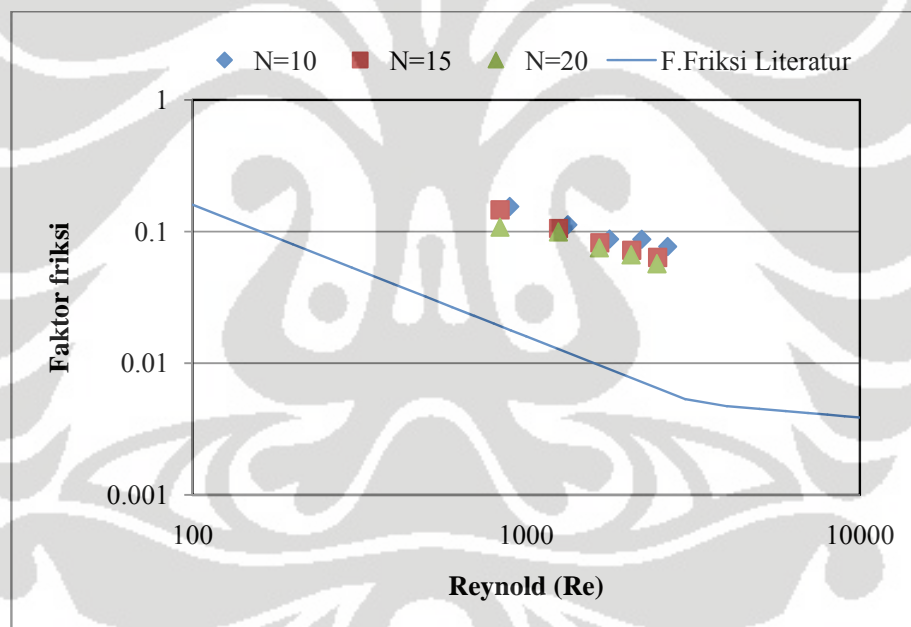
Gambar 4.14 Profil penurunan tekanan terhadap variasi kecepatan aliran

Berdasarkan grafik dapat dilihat bahwa kenaikan laju alir pelarut berbanding lurus dengan penurunan tekanan.. Semakin tinggi laju alir maka profil alirannya akan semakin ke arah turbulen dan kemungkinan terjadi gesekan semakin tinggi sehingga penurunan tekanan pada modul akan semakin tinggi. Pada grafik juga diperlihatkan bahwa jumlah serat merupakan salah satu faktor mempengaruhi penurunan tekanan. Semakin banyak jumlah serat di dalam modul maka luas permukaan kontak dinding dengan fluida yang mengalir semakin meningkat sehingga gesekan yang terjadi juga akan semakin besar dan mengakibatkan penurunan tekanan juga akan menjadi tinggi.



Gambar 4.15 Hubungan bilangan Reynold dengan penurunan tekanan

Kecepatan alir pelarut merupakan salah satu fungsi linear dari bilangan Reynold sehingga peningkatan bilangan Reynold menyebabkan penurunan tekanan pada modul akan menjadi besar. Sementara semakin tinggi penurunan tekanan maka gaya gesek yang ditimbulkan akan semakin tinggi namun faktor friksi yang terjadi semakin rendah rendah karena faktor friksi berlawanan dengan kecepatan fluida sesuai dengan persamaan (2.23) untuk faktor friksi Fanning. Untuk fluida dengan kecepatan tinggi maka aliran akan semakin turbulen sehingga gesekan yang dihasilkan juga semakin tinggi. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya friksi yang dihasilkan dari gerak momentum antar fluida maupun dengan dinding, namun faktor friksi akan rendah karena faktor friksi merupakan besaran yang sebanding dengan gaya kinetik suatu fluida bergerak. Hubungan antara bilangan Reynold dengan faktor friksi diperlihatkan melalui grafik berikut.

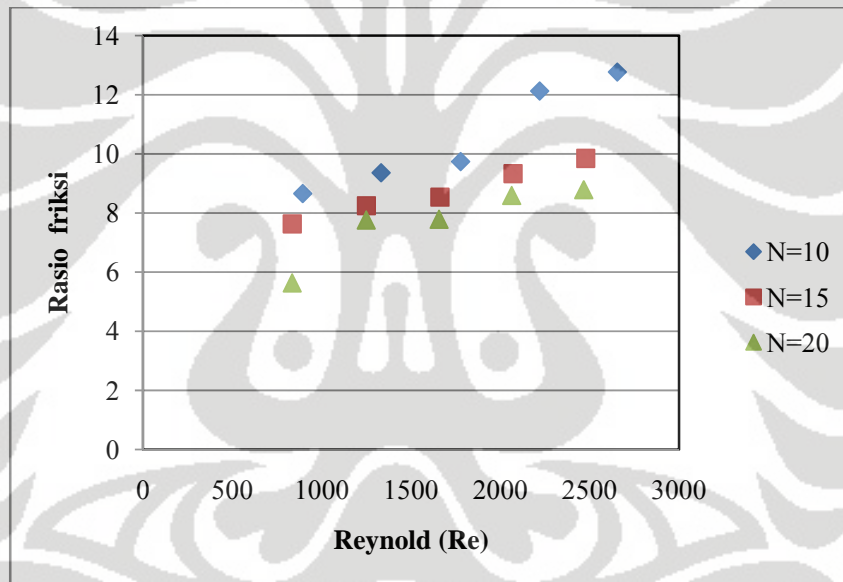


Gambar 4.16 Hubungan bilangan Reynold terhadap faktor friksi

Pada grafik terlihat bahwa bilangan Reynold berbanding terbalik dengan faktor friksi. Untuk kenaikan bilangan Reynold yang diwakili dengan peningkatan laju alir akan menyebabkan penurunan faktor friksi. Namun dalam hal ini aliran yang terjadi seluruhnya berada pada kondisi laminar sehingga penurunan faktor friksi tidak terlalu besar karena friksi yang ditimbulkan akibat aliran fluida tidak terlalu besar. Variasi jumlah serat juga mengindikasikan bahwa semakin besar

jumlah serat akan mengakibatkan penurunan faktor friksi dan bilangan Reynold. Hal ini dikarenakan adanya faktor diameter equivalen yang berhubungan dengan void fraction (fraksi kekosongan). Jumlah serat yang tinggi akan membuat fraksi kekosongan menjadi rendah. Hal ini akan menyebabkan faktor friksi akan menjadi semakin rendah. Namun, seperti yang terlihat dari grafik indikasi ini tidak terlalu berpengaruh..

Selain faktor friksi dalam modul, perhitungan friksi literatur juga dilakukan untuk membandingkan besar friksi yang terbentuk dengan friksi ideal yang hanya dipengaruhi bilangan Reynold karena pengaruh kecepatan aliran. Perbandingan ini disebut dengan rasio friksi sesuai dengan persamaan (3.8). Hubungan rasio friksi terhadap bilangan Reynold yang ditunjukkan dengan grafik berikut.



Gambar 4.17 Hubungan bilangan Reynold terhadap friksi rasio

Pada grafik terlihat peningkatan bilangan Reynold akan meningkatkan rasio friksi. Peningkatan ini terjadi karena besarnya penambahan faktor friksi pada modul lebih tinggi dibandingkan penambahan friksi karena bilangan Reynold. Hal ini disebabkan karena faktor friksi pada modul merupakan faktor friksi actual yang dipengaruhi oleh banyak faktor seperti adanya tahanan, bentuk geometris membran, pengotor dan lain-lain sehingga nilainya pasti akan lebih besar dibandingkan dengan literatur.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada modul yang sama, seiring dengan peningkatan laju alir pelarut akan meningkatkan koefisien perpindahan massa dan fluks CO_2 .
2. Pada laju pelarut/absorben yang sama, seiring dengan peningkatan jumlah serat maka koefisien perpindahan massa dan fluks CO_2 mengalami penurunan.
3. Fluks yang dihasilkan oleh DEA 0,0015 M mencapai $0.002390055 \text{ mol/m}^2\text{s}$, sementara fluks yang dihasilkan oleh NaOH 0,01 M mencapai $0,001918 \text{ mol/m}^2\text{s}$ dan fluks yang dihasilkan oleh air bisa mencapai $2,65983 \cdot 10^{-10} \text{ mol/m}^2\text{s}$
4. Fluks Korelasi perpindahan massa yang terjadi di dalam kontraktor membran serat berongga dengan pelarut DEA dapat dinyatakan sebagai:
$$Sh = 407,4 \cdot e^{-2.73x} \cdot Re^{0.52433}$$
5. Kenaikan laju alir dan jumlah serat akan meningkatkan penurunan tekanan di dalam modul akibat peningkatan friksi yang terjadi.
6. Proses absorpsi CO_2 oleh pelarut DEA melalui kontakor serat berongga merupakan salah satu alternatif teknologi yang efektif untuk pemisahan CO_2 .

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Dilakukan penelitian lanjutan untuk mengetahui batas maksimum konsentrasi DEA agar tidak merusak membran
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk umpan berupa gas campuran sehingga teknologi dapat diterapkan dalam industri terutama industri pengolahan gas alam

DAFTAR REFERENSI

- Al-Marzouqi, Mohamed, Muftah H.El-Naas, Sayed A.M.Marzouk, Mohamed A.Al-Zarooni, Nadia Abdulatif, Rami Faiz, (2007). *Modeling of CO₂ absorption in membrane contactors*. (Elsevier, Separation Purification Technology, 1-8)
- Atchariyawut, Supakorn, Ratana Jiratananon, Rong Wang, (2007). *Separation of CO₂ from CH₄ by using gas-liquid membrane contacting process*. (Elsevier, Journal of Membrane Science, 304, 163-172)
- Bird, R. Byron, et.al. Transport Phenomena (USA: John Wiley & Sons, 1960)
- Costello, M.J., et.al. The effect of shell side hydrodynamics on the performance of axialflow hollow fibre modules. (Journal of Membrane Science 80, 1993) hal.1-11
- Dortmundt, D., Doshi Kishore, (1999). *Recent Development in CO₂ Removal Membrane Technology*. UOP Journal (www.uop.com, 12 April 2008)
- Feron, Paul H.M., Albert E.Jansen, (2001). *CO₂ separation wiht polyolefin membrane contactors and dedicated absorption liquids: performances and prospects*. (Netherlands: Elsevier , separation and purification technology, 27, 231-242)
- Gabelman, A., S.T. Hwang (1999). *Hollow Fiber Membrane Contactors*. (Cincinnati: Elsevier, Journal of Membrane Science, 159, 61-106)
- Gong, Yanwen, Zhi Wang, Sichang Wang, (2006). *Experiment and simulation of CO₂ removal by mixed amines in a hollow fiber membrane module*. (Elsevier, Chemical Engineering and Processing, 45, 652-660)
- Kartohardjono, S. (2004). "Pemindahan oksigen terlarut dari air melalui kontaktor membran tak berpori via proses degassing vakum". Jurnal Seminar Nasional Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia
- Li, Jing-Liang, Bing-Hung Chen (2005). *Review of CO₂ absorption using chemical solvent in hollow fiber membrane contactors*. (Elsevier, Separation and Purification Technology, 41, 109-122)
- Mulder, Marcel, *Basic principles of membrane technology*, (Netherland: Kluwer Academic Publisher, 1997)

- Perry, R.H., Green D.M.Howe. *Perry's Chemical Engineering Handbook*. McGraw Hill,1999
- Wang, R., D.F.Li, C.Zhou, M.Liu, D.T.Liang, (2004). *Impact of DEA solutions with and without CO₂ loading on porous polypropylene membrane intended for use as contactors*. (Elsevier, Journal of Membrane Science, 229, 147-157)
- Wang, R., D.F.Li, D.T.Liang, (2004). *Modeling of CO₂ capture by three typical amine solutions in hollow fiber membrane contactors*. (Elsevier, Chemical engineering and Processing, 43, 849-856)
- Vladisavljevic, G. T. Use of polysulfone hollow/or bubbleless membrane oxygenation/deoxygenation of water (Yugoslavia: Elsevier, Separation and Purification Technology 17, 1999) hal.1-10
- Zhang, Hong-Yan, Rong Wang, David Tee Liang, Tay Joo Hwa, (2006). *Modeling and experimental study of CO₂ absorption in a hollow fiber membrane contactor*. (Elsevier, Journal of membrane Science, 1-10)
- www.wikipedia.org (Senyawa amina, diakses 14 Maret 2009)
- www.us-epa.gov (DEA (Anonim), 20 April 2008)

LAMPIRAN A DATA PENELITIAN

A.1 Studi Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Air

A.1.1 Data Perpindahan Massa untuk Pelarut Air dengan jumlah serat 10

Flow Air	Data 1		Data 2		Data 3	
ltr/jam	pH	T (C)	pH	T (C)	pH	T (C)
awal	6.98	27.2	7	27.2	6.99	27.2
100	5.43	28.3	5.44	28.5	5.43	28.5
150	5.48	28.1	5.49	28.2	5.48	28.3
200	5.5	28.2	5.52	28.2	5.51	28.2
250	5.53	28.1	5.54	28.2	5.53	28.2
300	5.56	27.9	5.56	28	5.55	28.1

A.1.2 Data Perpindahan Massa untuk Pelarut Air dengan jumlah serat 15

Flow Air	Data 1		Data 2		Data 3	
ltr/jam	pH	T (C)	pH	T (C)	pH	T (C)
awal	6.96	27.3	6.99	27.2	7.02	26.9
100	5.63	28.4	5.64	28.4	5.65	28.5
150	5.66	28.5	5.69	28.2	5.7	28.3
200	5.7	28.3	5.72	28.2	5.74	28.1
250	5.74	28	5.74	28.2	5.76	28
300	5.76	27.9	5.77	28	5.78	27.9

A.1.3 Data Perpindahan Massa untuk Pelarut Air dengan jumlah serat 20

Flow Air	Data 1		Data 2		Data 3	
ltr/jam	pH	T (C)	pH	T (C)	pH	T (C)
awal	7.01	26.9	7.02	26.8	6.99	27.2
100	5.91	28.4	5.92	28.5	5.9	28.5
150	5.95	28.4	5.97	28.4	5.94	28.5
200	5.99	28.2	6.01	28.2	5.98	28.3
250	6.02	28	6.03	28.2	6.01	28.1
300	6.05	27.8	6.05	28.1	6.03	28

A.2 Studi Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut DEA (*diethanolamine*)

A.2.1 Data Perpindahan Massa untuk Pelarut DEA dengan jumlah serat 10

Flow DEA ltr/jam	Data 1		Data 2		Data 3	
	pH	T (C)	pH	T (C)	pH	T (C)
awal	10.05	27.1	10.01	28	10.03	26.9
100	9.43	28	9.39	28.3	9.42	28
150	9.55	28.1	9.51	28.1	9.54	28.1
200	9.6	28.2	9.57	28.8	9.59	28.3
250	9.65	28.3	9.62	28	9.63	28
300	9.69	28.2	9.65	29.1	9.67	28

A.2.2 Data Perpindahan Massa untuk Pelarut DEA dengan jumlah serat 15

Flow DEA ltr/jam	Data 1		Data 2		Data 3	
	pH	T (C)	pH	T (C)	pH	T (C)
awal	10.05	28.1	10.07	28.1	10.03	28
100	9.51	29	9.53	29.1	9.48	29.1
150	9.61	29.1	9.64	29.1	9.59	29.1
200	9.67	29.2	9.69	29.2	9.65	29.2
250	9.7	29.1	9.72	29.1	9.69	29.2
300	9.73	29.1	9.75	29.1	9.72	29.1

A.2.3 Data Perpindahan Massa untuk Pelarut DEA dengan jumlah serat 20

Flow DEA ltr/jam	Data 1		Data 2		Data 3	
	pH	T (C)	pH	T (C)	pH	T (C)
awal	10.07	28.2	10.05	28	10.07	28
100	9.61	29	9.59	28.9	9.6	28.9
150	9.7	29.1	9.69	29	9.69	29.2
200	9.74	29.2	9.73	29.1	9.74	29.2
250	9.78	29.2	9.76	29.2	9.77	29.1
300	9.8	29.3	9.78	29.3	9.79	29.2

A.3 Studi Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut DEA dengan gas campuran CO₂/CH₄

A.3.1 Data Persentase CO₂/CH₄

Laju alir (ltr/jam)	Data 1		Data 2	
	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)
100	15,8532	84,1468	16,0378	83,9622
150	17,9457	82,0543	17,9789	82,0211
200	19,7282	80,2718	20,7312	79,2688
250	23,258	76,748	25,0450	74,9550

A.3.2 Data pH untuk pelarut DEA gas campuran CO₂/CH₄

Laju alir (ltr/jam)	Data 1		Data 2	
	pH	T (C)	pH	T (C)
Awal	10,02	27,0	10,03	27,2
100	9,72	28,4	9,75	28,3
150	9,78	27,9	9,80	28,2
200	9,84	28,1	9,85	28,3
250	9,92	28,3	9,90	28,3

A.4 Studi Hidrodinamika

Q _L (Ltr/Jam)	Jumlah serat 10		Jumlah Serat 15		Jumlah Serat 20	
	ΔH(mH ₂ O)	T(°C)	ΔH(mH ₂ O)	T(°C)	ΔH(mH ₂ O)	T(°C)
100	0.38	28.2	0.4	28.5	0.5	28.3
150	0.4	28.3	0.44	28.1	0.56	28
200	0.42	28.3	0.46	28.3	0.6	28.2
250	0.46	28	0.5	28.4	0.66	28.4
300	0.48	27.9	0.54	28.2	0.7	28.1

LAMPIRAN B CONTOH PERHITUNGAN

B.1 Perhitungan Studi Perpindahan Massa

Dalam perhitungan Koefisien Perpindahan Massa, baik untuk absorpsi CO₂ menggunakan air dan larutan DEA digunakan persamaan:

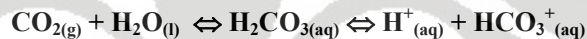
$$K_L = \frac{Q}{A} \ln \left[\frac{C^* - C_0}{C^* - C_1} \right]$$

dimana; $A = n \pi d_f L$

B.1.1 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa untuk Pelarut Air

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

Reaksi CO₂ dengan air dijabarkan dengan persamaan reaksi berikut:



Sehingga persamaan untuk konstanta kesetimbangan CO₂ menjadi:

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

Sementara dari berdasarkan literature (Perry's Che Handbook 8th.ed) konstanta kesetimbangan CO₂ untuk air dapat menggunakan persamaan berikut:

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

Berikut contoh perhitungan untuk menghitung koefisien perpindahan massa untuk pelarut air dengan data-data penelitian seperti dibawah ini:

(jumlah serat) = 10	Q (laju alir) = 100 ltr/jam
pH _{awal} = 6.98	pH _{akhir} = 5.43
Tawal = 27,2 °C = 300.35 K	Takhir = 28,3 °C = 301.45 K

dari literatur K_{CO_2} pada suhu 25°C = 4,38.10⁻⁷ mol/L

B.1.1.1 Menghitung Konstanta Keseimbangan (K_{CO_2})

Berdasarkan data-data diatas konstanta kesetimbangan CO_2 dapat dihitung dengan persamaan berikut;

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

$$\ln \left[\frac{K_{CO_2}}{4,38 \cdot 10^{-7}} \right] = 40,557 \left(1 - \frac{298,15}{301,45} \right) + 36,782 \ln \left(\frac{301,45}{298,15} \right)$$

$$\ln \left[\frac{K_{CO_2}}{4,38 \cdot 10^{-7}} \right] = 2,33697$$

$$K_{CO_2} = 2,33697 \times 4,38 \cdot 10^{-7} = 1,02359 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$$

B.1.1.2 Menghitung $[CO_2]_0$ untuk pH awal air = 6,98

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

- Menghitung $[H^+]_0$

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

- $[H^+]_0 = 10^{-6,98}$

- $[H^+]_0 = 1,0471 \cdot 10^{-7} \text{ mol/L}$

- Menghitung $[CO_2]_0$

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

- $[CO_2]_0 = \frac{[1,0471 \cdot 10^{-7}]^2}{1,02359 \cdot 10^{-6}}$

- $[CO_2]_0 = 1,0712 \cdot 10^{-8} \text{ mol/L}$

B.1.1.3 Menghitung $[CO_2]_t = (C_1)$ Untuk pH campuran = 5,43

- Menghitung $[H^+]_t$

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

- $[H^+]_t = 10^{-5,43}$

- $[H^+]_t = 3,71535 \cdot 10^{-6} \text{ mol/L}$

- Menghitung $[CO_2]_t$

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

$$\begin{aligned} \text{➤} \quad [CO_2]_t &= \frac{[3,71535 \cdot 10^{-6} \text{ mol/L}]^2}{1,02359 \times 10^{-6} \text{ mol/L}} \\ \text{➤} \quad [CO_2]_t &= [CO_2]_1 = \mathbf{1.34857 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L}} \end{aligned}$$

B.1.1.3 Menghitung Solubility CO2 murni dalam air C*

$$k_H = 0,036 \cdot \exp\left(-2200\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^0}\right)\right)$$

$$k_H = 0,036 \cdot \exp\left(-2200\left(\frac{1}{301,45} - \frac{1}{298,15}\right)\right)$$

$$k_H = 0.039173868$$

$$C^* = \frac{k_H}{P} = \frac{0.039173868}{1} = 0.039173868 \text{ mol/L}$$

B.1.1.4 Menghitung koefisien perpindahan massa untuk pelarut air

Dari persamaan (2.12)

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

dimana,

$$A = n \pi d_f L = 10 \times \frac{22}{7} \times 0.0027 \times 0.4 = 3,394 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$Q_L = 100 \times \frac{\text{Ltr}}{\text{jam}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ Ltr}} \times \frac{1 \text{ jam}}{3600 \text{ s}} = 2,7778 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$k_L = \frac{2,78 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{3,394 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2} \ln \left[\frac{0.039173868 \text{ mol/L} - 1,0712 \cdot 10^{-8} \text{ mol/L}}{0.039173868 \text{ mol/L} - 1.34857 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L}} \right]$$

$$k_L = \mathbf{2,81549 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}}$$

B.1.1.5 Menghitung Fluks perpindahan massa (J) untuk pelarut air

Fluks perpindahan massa dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$J = K_L \Delta C$$

dimana:

$$\Delta C = C_1 - C_0$$

Sehingga,

$$J = 2,81549 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \left(1.34857 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 1,1271 \cdot 10^{-8} \frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) \times \left(\frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \right)$$

$$J = \mathbf{3.79386 \cdot 10^{-9} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})}$$

Penelitian dilakukan sebanyak tiga kali untuk tiap variasi, pada perhitungan data yang diperoleh diolah masing-masing baru selanjutnya di rata-rata. Berikut adalah contoh hasil yang diperoleh untuk jumlah serat sebanyak 10 dengan menggunakan pelarut air.

Q	Data 1		Data 2		Data 3	
(Lt/jam)	K _L (m/s)	J (mol/m ² .s)	K _L (m/s)	J (mol/m ² .s)	K _L (m/s)	J (mol/m ² .s)
100	2.815E-07	3.794E-09	2.542E-07	3.109E-09	2.662E-07	3.409E-09
150	3.546E-07	3.994E-09	3.293E-07	3.453E-09	3.353E-07	3.589E-09
200	4.193E-07	4.198E-09	3.824E-07	3.491E-09	4.004E-07	3.829E-09
250	4.693E-07	4.198E-09	4.359E-07	3.629E-09	4.564E-07	3.979E-09
300	5.187E-07	4.251E-09	5.044E-07	4.031E-09	5.136E-07	4.189E-09

Selanjutnya data-data tersebut dirata-rata sehingga diperoleh hasil sesuai tabel berikut.

Q	v _L	Rata-rata	
(Lt/jam)	(m/s)	K _L (m/s)	J (mol/m ² .s)
100	0.122712723	2.67367E-07	3.43774E-09
150	0.184069084	3.39812E-07	3.67892E-09
200	0.245425445	4.00748E-07	3.83944E-09
250	0.306781806	4.53937E-07	3.93572E-09
300	0.368138168	5.12289E-07	4.15723E-09

Untuk setiap perhitungan variabel yang lain dilakukan hal yang sama.

B.1.2 Perhitungan korelasi perpindahan massa untuk pelarut air

Korelasi perpindahan massa untuk pelarut air meliputi perhitungan bilangan Sherwood (S_h) dan bilangan Reynolds (R_e).

B.1.2.1 Menghitung bilangan Sherwood (S_h)

Bilangan Sherwood dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

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

B.1.2.1.1 Menghitung nilai ε (faktor kekosongan)

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

$$\varepsilon = 1 - 10 \left(\frac{0,0027 \text{ m}}{0,019 \text{ m}} \right)^2$$

$$\varepsilon = 0,798$$

B.1.2.1.2 Menghitung nilai diameter ekuivalen (d_e)

$$d_{ekuivalen} = \frac{d_f}{\sqrt{1 - \varepsilon}}$$

$$d_{ekuivalen} = \frac{0,0027}{\sqrt{1 - 0,798}}$$

$$d_e = 6,008 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

B. 1.2.1.3 Menghitung nilai Difusivitas air (D)

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

dimana,

D_1 = difusivitas pada suhu $25^{\circ}\text{C} = 1,96 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} = 1,96 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

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

$T_1 = 25^{\circ}\text{C} = 298 \text{ K}$

$T_2 =$ suhu sampel = $28,3^{\circ}\text{C}$

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

μ_2 = viskositas pada suhu tertentu/sampel (cp)

Dari tabel lampiran C interpolasi diperoleh (μ_2) viskositas pada $T_2 = 28,3^{\circ}\text{C}$

$\mu = 0.8148$ (29°C)

$\mu = 0.8327$ (28°C)

$$\frac{29 - 28,3}{29 - 28} = \frac{0,8148 - \mu_2}{0,8148 - 0,8327}$$

$$\mu_2 = 0,827797 \text{ cp}$$

Maka nilai Difusivitas,

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

$$\frac{1,96 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \times 25^\circ\text{C}}{0,8904 \text{ cp}} = \frac{D_2 \times 28,3^\circ\text{C}}{0,827797 \text{ cp}}$$

$$D_2 = 1,6097 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

B.1.2.1.4 Bilangan Sherwood (Sh) untuk pelarut Air

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

$$Sh = 2,81549 \cdot 10^{-7} \text{ m/s} \times \frac{6,008 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1,6097 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Sh = 1,05089598$$

B.1.2.2 Menghitung bilangan Reynolds (Re)

Untuk menghitung bilangan Reynolds menggunakan persamaan sebagai berikut:

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

B.1.2.2.1 Menghitung laju alir pelarut (V_L)

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

$$A_{flow} = \frac{1}{4} \pi (dp^2 - ndf^2)$$

dimana,

$$Q_L = 100 \times \frac{\text{Ltr}}{\text{jam}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ Ltr}} \times \frac{1 \text{ jam}}{3600 \text{ s}} = 2,7778 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_{flow} = \frac{1}{4} \pi (ds^2 - ndf^2)$$

$$A_{flow} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 ((0,019 \text{ m})^2 - 10(0,0027 \text{ m})^2)$$

$$A_{flow} = 2,264 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

sehingga,

$$V_L = \frac{2,7778 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{2,264 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$V_L = 0,1227 \text{ m/s}$$

B.1.2.2.2 Bilangan Reynolds (Re) untuk pelarut air

Setelah mengetahui nilai V_L , bilangan Reynolds (Re) dapat dihitung,

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

dimana:

$$d_e = 6,008 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$V_L = 0,1227 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_2 = 0,827797 \text{ cp} = 8,27797 \cdot 10^{-4} \text{ kg/(m.s)}$$

sehingga,

$$Re = \frac{6,008 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,1227 \text{ m/s}}{8,27797 \cdot 10^{-4} \text{ kg/(m.s)}}$$

$$Re = 890,675265$$

B.1.3 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa untuk Pelarut DEA

Berikut contoh perhitungan untuk menghitung koefisien perpindahan massa untuk pelarut DEA dengan data-data penelitian seperti dibawah ini:

$$n \text{ (jumlah serat)} = 10$$

$$Q \text{ (laju alir)} = 100 \text{ lt/jam}$$

$$pH_{awal} = 10,02$$

$$pH_{akhir} = 9,43$$

$$T_{awal} = 27,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{akhir} = 28,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

berdasarkan literatur, K_b (tetapan kesetimbangan basa) untuk DEA pada suhu antara 28°C-29°C = $7,93597 \cdot 10^{-6} \text{ mol/L}$

B.1.3.1 Menghitung konsentrasi larutan DEA awal

$$pH_{awal} \text{ larutan} = 10,05$$

$$pOH = 14 - pH = 14 - 10,05 = 3,95$$

$$[OH^-] = 10^{-(pOH)} = 10^{-(3,95)}$$

$$[OH^-] = 1,12202 \cdot 10^{-4} \text{ mol/L}$$

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

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

$$M_{DEA} = \frac{(1,12202 \cdot 10^{-4} \text{ mol/L})^2}{7,93597 \cdot 10^{-6} \text{ mol/L}}$$

$$M_{DEA} = 1,586354 \cdot 10^{-3} = 0,001586354 \text{ mol/L}$$

B.1.3.2 Menghitung Konsentrasi Larutan sampel (DEA)

pH akhir larutan = 9,43

pOH = 14-pH = 14-9,43 = 4,57

$$[OH^-] = 10^{-(pOH)} = 10^{-(4,57)}$$

$$[OH^-] = 2,69153 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L}$$

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

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

$$M_{DEA} = \frac{(2,69153 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L})^2}{7,93597 \cdot 10^{-6} \text{ mol/L}}$$

$$M_{DEA} = 9,12851 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L}$$

B.1.3.3 Menghitung konsentrasi CO₂ mula-mula

CO₂₍₀₎ = C₀ = 0, ini disebabkan karena pada keadaan awal belum ada CO₂ yang diabsorp oleh DEA.

B.1.3.4 Menghitung konsentrasi CO₂ yang terbentuk (CO₂₍₁₎ = C₁)

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

$$C_1 = \frac{1}{2} (1,586354 \cdot 10^{-3} \text{ mol/L} - 9,12851 \cdot 10^{-5} \text{ mol/L})$$

$$= 0,000747534 \text{ mol/L}$$

B.1.3.5 Menghitung konsentrasi konsentrasi CO₂ dalam keadaan setimbang dengan DEA (CO₂^{*} = C^{*})

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

$$C^* = \frac{1}{2} 0,001586354 = 0,000793177 \text{ mol/L}$$

B.1.3.6 Menghitung konstanta perpindahan massa (k_L)

Konstanta perpindahan massa dapat dihitung dengan persamaan berikut:

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

dimana:

$$A = n \pi d_f L = 3,394 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$Q = 100 \text{ Ltr/Jam} = 2,78 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

sehinggaa,

$$k_L = \frac{2,78 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{3,394 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2} \ln \left[\frac{0,000793177 \text{ mol/L} - 0}{0,000793177 \text{ mol/L} - 0,000747534 \text{ mol/L}} \right]$$

$$k_L = 0,002336611 \text{ m/s}$$

B.1.3.7 Menghitung Fluks Perpindahan Massa (J) untuk DEA

Fluks perpindahan massa dapat dihtung dengan persamaan berikut:

$$J = K_L \Delta C$$

dimana:

$$\Delta C = C_1 - C_0$$

Sehingga,

$$J = 0,002336611 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \left(0,000747534 \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0 \right) \times \left(\frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \right)$$

$$J = 0,001746697 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

B.1.4 Perhitungan korelasi perpindahan massa untuk pelarut DEA

Korelasi perpindahan massa untuk pelarut DEA meliputi perhitungan bilangan Sherwood (S_h) dan bilangan Reynolds (R_e).

B.1.4.1 Menghitung bilangan Sherwood (S_h)

Bilangan Sherwood dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

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

B.1.4.1.1 Menghitung nilai ε (faktor kekosongan)

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

$$\varepsilon = 1 - 10 \left(\frac{0,0027 \text{ m}}{0,019 \text{ m}} \right)^2 = 0,798$$

B.1.4.1.2 Menghitung nilai diameter ekuivalen (d_e)

$$d_{ekuivalen} = \frac{d_f}{\sqrt{1 - \varepsilon}}$$

$$d_{ekuivalen} = \frac{0,0027}{\sqrt{1 - 0,798}} = 6,008 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

B. 1.4.1.3 Menghitung nilai Difusivitas DEA (D)

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

dimana,

D_1 = difusivitas pada suhu 25°C = $1,96 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ = $1,96 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

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

T_1 = 25°C

T_2 = suhu sampel = $28,0^{\circ}\text{C}$

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

μ_2 = viskositas pada suhu tertentu/sampel (cp)

Dari tabel lampiran D diperoleh (μ_2) viskositas pada $T_2 = 28,0^{\circ}\text{C}$ = 0,8327

Maka nilai Difusivitas,

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

$$\frac{1,96 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \times 25^{\circ}\text{C}}{0,8904 \text{ cp}} = \frac{D_2 \times 28,0^{\circ}\text{C}}{0,8327 \text{ cp}}$$

$$D_2 = 1,63791 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

B. 1.4.1.4 Bilangan Sherwood (Sh) untuk pelarut DEA

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

$$Sh = 2,336611 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \times \frac{6,008 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1,63791 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Sh = 8433,137871$$

B.1.4.2 Menghitung bilangan Reynolds (R_e)

Untuk menghitung bilangan Reynolds menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_e = \frac{d_e \rho v}{\mu}$$

B.1.4.2.1 Menghitung laju alir pelarut (V_L)

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

$$A_{flow} = \frac{1}{4} \pi (dp^2 - ndf^2)$$

dimana,

$$Q_L = 100 \times \frac{Ltr}{jam} \times \frac{1 m^3}{1000 Ltr} \times \frac{1 jam}{3600 s} = 2,7778 \cdot 10^{-5} m^3/s$$

$$A_{flow} = \frac{1}{4} \pi (ds^2 - ndf^2)$$

$$A_{flow} = \frac{1}{4} \cdot 3,14 ((0,019m)^2 - 10(0,0027m)^2)$$

$$A_{flow} = 2,264 \cdot 10^{-4} m^2$$

sehingga,

$$V_L = \frac{2,7778 \cdot 10^{-5} m^3/s}{2,264 \cdot 10^{-4} m^2} = 0,1227 m/s$$

B.1.4.2.2 Bilangan Reynolds (R_e) untuk pelarut DEA

Setelah mengetahui nilai V_L , bilangan Reynolds (R_e) dapat dihitung,

$$R_e = \frac{d_e \rho v}{\mu}$$

dimana:

$$d_e = 6,008 \cdot 10^{-3} m$$

$$V_L = 0,1227 m/s$$

$$\rho = 1090 m^3/kg$$

$$\mu_2 = 0,8327 cp = 8,327 \cdot 10^{-4} kg/(m \cdot s)$$

sehingga,

$$R_e = \frac{6,008 \cdot 10^{-3} \text{ m } 1090 \text{ kg/m}^3 0,1227 \text{ m/s}}{8,327 \cdot 10^{-4} \text{ kg/(m.s)}}$$

$$R_e = 964,3475134$$

B.2 Perhitungan Studi Hidrodinamika

Studi Hidrodinamika meliputi perhitungan faktor friksi modul, faktor friksi literatur yang selanjutnya kedua faktor friksi tersebut dibandingkan sebagai rasio friksi. Perhitungan dilakukan hanya dengan pelarut air karena massa jenis air dan DEA tidak jauh berbeda (air = 1000 kg/m³, DEA = 1090 kg/m³)

B.2.1 Menghitung ΔP dari data perbedaan ketinggian (mH₂O)

data yang dipakai pada perhitungan ini ΔH (mH₂O) = 0,38 m

$$\Delta P = \rho g \Delta H$$

$$\Delta P = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,8 \text{ m/s}^2 \times 0,38 \text{ m}$$

$$\Delta P = 3.724 \text{ Pa} = 3.724 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

Kemudian membuat plot grafik antara laju alir Q_L Vs ΔP sehingga diperoleh nilai intercept. Nilai intercept ini digunakan untuk mengkalibrasi penurunan tekanan agar dimulai dari titik nol. Untuk data tersebut pada dengan jumlah serat (n) =10, diperoleh intercept sebesar 3413,1 sehingga,

$$\Delta P \text{ baru} = 3724 - 3413,1 = 310,9 \text{ Pa}$$

B.2.2 Menghitung Faktor Friksi Modul

Faktor friksi modul dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$f = \frac{d_e \cdot \Delta P}{4 \cdot L_f \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \rho \cdot v^2}$$

dimana data-datanya adalah sebagai berikut;

$$d_e = 6,008 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$V_L = 0,1227 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$L_f = 0,4$$

$$\Delta P = 310,9 \text{ Pa} = 310,9 \text{ kg/(m.s}^2)$$

sehingga,

$$f = \frac{6,008 \cdot 10^{-3} \text{ m} \times 310,9 \frac{\text{kg}}{\text{m s}^2}}{4 \times 0,4 \text{ m} \times (0,5) \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times (0,1227 \text{ m/s})^2}$$

$$f = 0,155061919$$

B.2.3 Menghitung Faktor Friksi Literatur

Faktor Friksi literatur ($Re < 4000$) dihitung dengan persamaan berikut.

$$f = \frac{16}{Re}$$

dimana,

$$Re = 890,6755265 \quad \text{sehingga,}$$

$$f = \frac{16}{890,6755265} = 0,017963893$$

B.2.4 Menghitung Rasio Friksi

Rasio friksi dihitung dengan persamaan berikut;

$$f_{rasio} = \frac{f_{modul}}{f_{literatur}}$$

$$f_{rasio} = \frac{0,155061919}{0,017963893} = 8,631865995$$

LAMPIRAN C HASIL PERHITUNGAN

C.1 Hasil Perhitungan untuk Perpindahan Massa

C.1.1 Hasil Perpindahan Massa dengan Umpan Gas Berupa CO₂ Murni

C.1.1.1 Hasil Perpindahan Massa dengan Jumlah Serat 10 untuk Pelarut Air

Q (Lt/jam)	v_L (m/s)	K_L (m/s)	J (mol/m ² .s)	Re	Sh
100	0.122712723	2.67367E-07	3.43774E-09	893.3511257	1.005474551
150	0.184069084	3.39831E-07	3.67932E-09	1333.0279	1.26099905
200	0.245425445	4.00773E-07	3.83991E-09	1777.364599	1.487282004
250	0.306781806	4.53974E-07	3.93635E-09	2220.052143	1.681360732
300	0.368138168	5.12361E-07	4.15841E-09	2654.176251	1.879474426

C.1.1.2 Hasil Perpindahan Massa dengan Jumlah Serat 10 untuk Pelarut DEA

Q (Lt/jam)	v_L (m/s)	K_L (m/s)	J (mol/m ² .s)	Re	Sh
100	0.122712723	0.002324049	0.001587446	970.1807619	8660.264435
150	0.184069084	0.002807702	0.001830006	1458.540534	10523.34761
200	0.245425445	0.003341605	0.002111349	1947.564859	12568.91015
250	0.306781806	0.003737322	0.002277184	2434.588103	14056.82927
300	0.368138168	0.004070226	0.002390055	2921.585749	15314.25418

C.1.1.3 Hasil Perpindahan Massa dengan Jumlah Serat 15 untuk Pelarut Air

Q (Lt/jam)	v_L (m/s)	K_L (m/s)	J (mol/m ² .s)	Re	Sh
100	0.140486928	6.87463E-08	3.41198E-10	835.0671911	0.211105444
150	0.210730392	8.68367E-08	3.62282E-10	1249.797623	0.265220017
200	0.280973855	1.01467E-07	3.69792E-10	1661.417076	0.30752867
250	0.351217319	1.1633E-07	3.87009E-10	2070.595283	0.349770458
300	0.421460783	1.30118E-07	4.02253E-10	2477.33607	0.388205869

C.1.1.4 Hasil Perpindahan Massa dengan Jumlah Serat 15 untuk Pelarut DEA

Q	v_L	K_L	J	Re	Sh
(Lt/jam)	(m/s)	(m/s)	(mol/m ² .s)		
100	0.140486928	0.002047676	0.001494331	923.3792538	6521.822487
150	0.210730392	0.002468517	0.001699076	1386.121722	7877.090681
200	0.280973855	0.002864233	0.001882354	1852.392943	9192.232735
250	0.351217319	0.003266231	0.002074202	2310.202871	10442.14958
300	0.421460783	0.003580292	0.002188406	2772.243445	11424.78801

C.1.1.5 Hasil Perpindahan Massa dengan Jumlah Serat 20 untuk Pelarut Air

Q	v_L	K_L	J	Re	Sh
(Lt/jam)	(m/s)	(m/s)	(mol/m ² .s)		
100	0.164282227	1.74997E-08	2.90337E-11	834.4184672	0.044953453
150	0.246423341	2.20949E-08	3.08107E-11	1248.863826	0.056428955
200	0.328564455	2.61273E-08	3.21176E-11	1656.583617	0.065832595
250	0.410705569	3.02378E-08	3.42546E-11	2063.148585	0.075442509
300	0.492846682	3.41266E-08	3.62104E-11	2466.752822	0.084322455

C.1.1.6 Hasil Perpindahan Massa dengan Jumlah Serat 20 untuk Pelarut DEA

Q	v_L	K_L	J	Re	Sh
(Lt/jam)	(m/s)	(m/s)	(mol/m ² .s)		
100	0.164282227	0.001746177	0.001299944	932.2790378	4779.687456
150	0.246423341	0.002091644	0.001446103	1403.74486	5780.916576
200	0.328564455	0.002462236	0.00161828	1874.509586	6830.676111
250	0.410705569	0.002763734	0.001729741	2343.136982	7666.455805
300	0.492846682	0.003090357	0.001869052	2818.210669	8621.576828

C.1.2 Hasil Perpindahan Massa dengan Umpan Gas Berupa Campuran CO₂/CH₄

Q	v_L	K_L	J	Re	Sh
(Lt/jam)	(m/s)	(m/s)	(mol/m ² .s)		
100	0.122712723	0.000866807	0.000535232	641.4723759	0.938903962
150	0.184069084	0.000998713	0.000548081	964.3523001	1.087866149
200	0.245425445	0.001155743	0.000586617	1284.367548	1.255393112
250	0.306781806	0.001287649	0.000609709	1607.277767	1.403199416

C.2 Hasil Perhitungan Studi Hidrodinamika

C.2.1 Hasil Studi Hidrodinamika dengan Jumlah Serat 10

Q (Lt/jam)	ΔP (Pa)	Re	f.friksi modul	f.friksi Literatur	rasio friksi
100	310.9	893.3511257	0.155061919	0.017910171	8.657796217
150	506.9	1333.0279	0.112363227	0.01200279	9.361457296
200	702.9	1777.364599	0.087643151	0.009002092	9.735864614
250	1094.9	2220.052143	0.087373326	0.007207046	12.12333377
300	1388.9	2654.176251	0.076968478	0.006028256	12.76799417

C.2.2 Hasil Studi Hidrodinamika dengan Jumlah Serat 15

Q (Lt/jam)	ΔP (Pa)	Re	f.friksi modul	f.friksi Literatur	rasio friksi
100	470.7	835.0671911	0.14624814	0.019160156	7.63293899
150	764.7	1249.797623	0.105597765	0.012802173	8.248489731
200	1058.7	1661.417076	0.082235451	0.009630365	8.539211359
250	1450.7	2070.595283	0.072118012	0.007727281	9.332950999
300	1842.7	2477.33607	0.063614817	0.006458558	9.849705015

C.2.3 Hasil Studi Hidrodinamika dengan Jumlah Serat 20

Q (Lt/jam)	ΔP (Pa)	Re	f.friksi modul	f.friksi Literatur	rasio friksi
100	549.1	834.4184672	0.108048538	0.019175052	5.63485596
150	1137.1	1248.863826	0.099445147	0.012811743	7.762090384
200	1529.1	1656.583617	0.075221735	0.009658463	7.788193389
250	2117.1	2063.148585	0.066654397	0.007755145	8.594870334
300	2607.1	2466.752822	0.05700102	0.006486267	8.787964258