



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMANFAATAN PELARUT ALAM DARI BUAH MENKUDU
(*MORINDA CITRIFOLIA*) UNTUK ABSORPSI GAS CO₂
MENGUNAKAN KONTAKTOR MEMBRAN SERAT
BERONGGA**

SKRIPSI

ANDRI KRESTIANTO

0405060113

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA

DEPOK

JUNI 2009



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMANFAATAN PELARUT ALAM DARI BUAH MENKUDU
(*MORINDA CITRIFOLIA*) UNTUK ABSORPSI GAS CO₂
MENGUNAKAN KONTAKTOR MEMBRAN SERAT
BERONGGA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

ANDRI KRESTIANTO

0405060113

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA

DEPOK

JUNI 2009

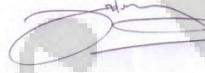
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Andri Krestianto

NPM : 0405060113

Tanda Tangan :



Tanggal : 26 Juni 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Andri Krestianto
NPM : 0405060113
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Pemanfaatan Pelarut Bahan Alam dari Buah
Mengkudu (*Morinda citrifolia*) Untuk Absorpsi Gas
CO₂ Menggunakan Kontaktor Membran Serat
Berongga

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. Eva Fathul Karamah, MT

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 26 Juni 2009

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana Teknik jurusan 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) Ir. Sutrasno Kartohardjono, MSc., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA., selaku ketua Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia;
- (3) Keluarga yaitu Mama, Bapak dan Indra yang selalu memberikan dukungan baik moril maupun materil dan atas doa-doanya untuk penulis;
- (4) M. Haikal Nur sebagai rekan penelitian yang selalu mendukung dalam penelitian;
- (5) Mang Ijal yang telah membantu penulis dalam hal apa pun yang berhubungan dengan penelitian;
- (6) Martiningtyas Yunitasari yang selalu memberikan perhatian, semangat dan mengingatkan penulis untuk bangun subuh setiap pagi;
- (7) Semua teman-teman yang tidak dapat disebutkan satu demi satu, yang selalu memberikan bantuan semangat di kala 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

Andri Krestianto

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

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

Nama : Andri Krestianto

NPM : 0405060113

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

Pemanfaatan Pelarut Bahan Alam dari Buah Mengkudu (*Morinda citrifolia*) Untuk Absorpsi Gas CO₂ Menggunakan Kontaktor Membran Serat Berongga

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 26 Juni 2009

Yang Menyatakan



Andri Krestianto

ABSTRAK

Nama : Andri Krestianto
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Pemanfaatan Pelarut Bahan Alam dari Buah Mengkudu (*Morinda citrifolia*) Untuk Absorpsi Gas CO₂ Menggunakan Kontaktor Membran Serat Berongga

Evaluasi efektifitas pelarut dari buah mengkudu untuk absorpsi gas CO₂ menggunakan kontaktor membran serat berongga telah diteliti. Pelarut yang digunakan adalah buah mengkudu dengan dosis 100 gram per liter air. Untuk studi perpindahan massa, hasil penelitian menunjukkan nilai koefisien perpindahan massa pada pelarut buah mengkudu lebih tinggi dibandingkan pada pelarut air namun perbedaannya tidak signifikan. Hasil penelitian juga menunjukkan peningkatan laju alir pelarut akan menaikkan koefisien perpindahan massa dan peningkatan jumlah serat akan menurunkan koefisien perpindahan massa. Sedangkan untuk studi hidrodinamika, kenaikan laju alir pelarut dan jumlah serat menyebabkan meningkatnya penurunan tekanan di dalam kontaktor membran.

Kata Kunci: kontaktor membran serat berongga; perpindahan massa; hidrodinamika

ABSTRACT

Name : Andri Krestianto
Study Program : Chemical Engineering
Tittle : Utilization of Natural Solvent From Fruit *Morinda Citrifolia* For CO₂ Gas Absorption Using Hollow Fiber Membrane Contactor

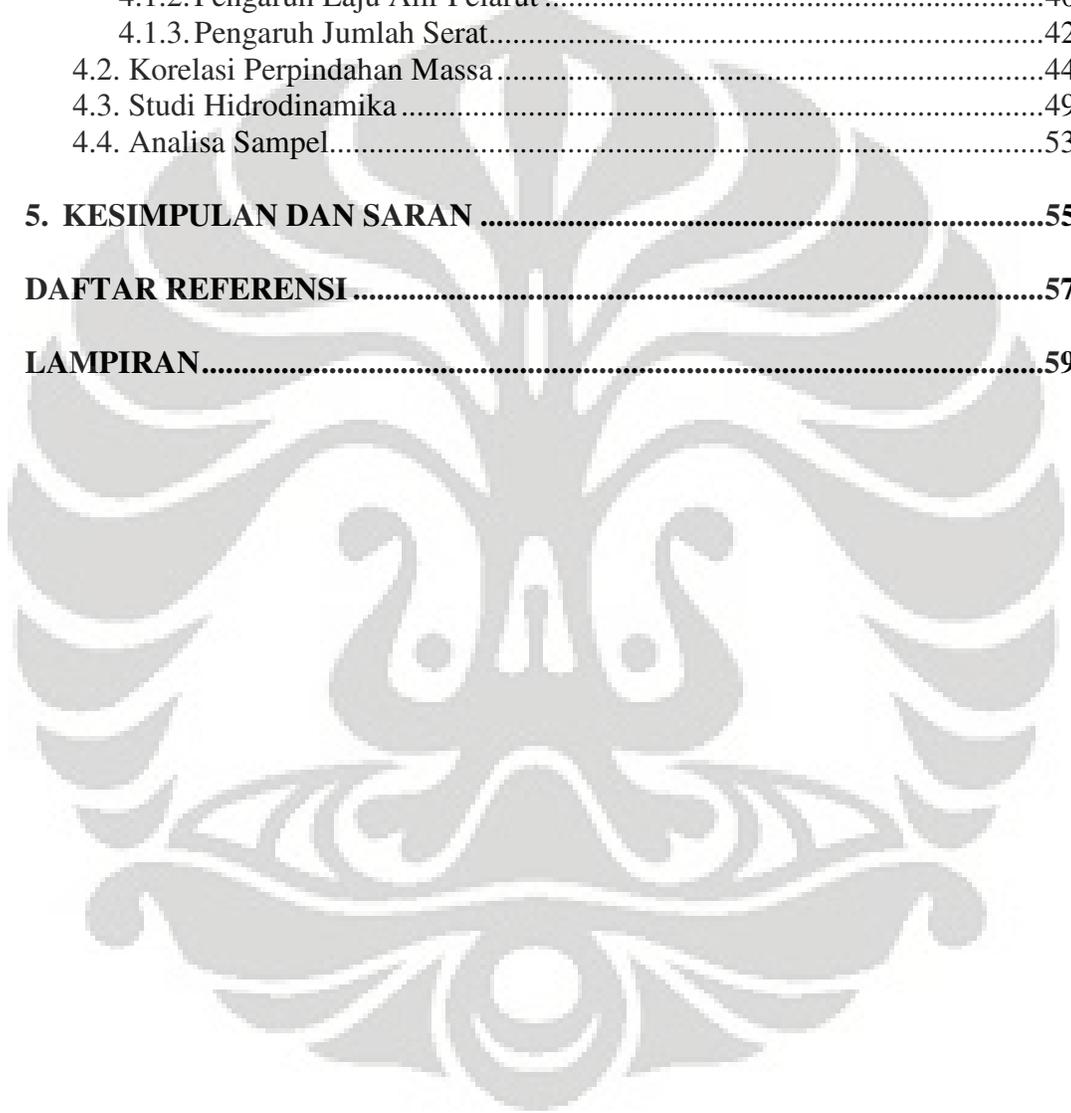
Evaluation of effectiveness natural solvent from *Morinda citrifolia* fruit for CO₂ gas absorption had already been researched. The solvent was solution from *Morinda citrifolia* fruit with dose 100 gram per liter of water. For mass transfer study, results showed that the value of mass transfer coefficient in *Morinda citrifolia* fruit solution is higher than water solvent, but the difference is not significant. The research result also showed that higher liquid flow rate will increase mass transfer coefficient. Otherwise the amount of fiber will decrease the mass transfer coefficient. While for hydrodynamic study, higher the liquid flow rate and amount of fiber will increase pressure drop in membrane contactor.

Keyword: hollow fiber membrane contactor; mass transfer; hydrodynamic

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
DAFTAR SIMBOL.....	xii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	5
1.5. Sistematika Penulisan.....	5
2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Mengkudu	6
2.2. Absorpsi CO ₂	9
2.3. Teknologi Membran.....	10
2.3.1 Membran	10
2.3.2 Membran Polipropilen	12
2.4. Kontaktor Membran.....	14
2.4.1 Kontaktor Membran Gas-Cair	15
2.4.2 Kontaktor Membran Cair-Cair.....	15
2.4.3 Kontaktor Membran Serat Berongga	15
2.4.4 Aplikasi Kontaktor Membran Serat Berongga.....	19
2.4.5 Studi Perpindahan Massa pada Kontaktor Membran Serat Berongga	21
2.4.6 Studi Hidrodinamika pada Kontaktor Membran Serat Berongga.....	23
3. METODE PENELITIAN	24
3.1. Pendahuluan	24
3.2. Diagram Alir Penelitian	24
3.3. Skema Alat.....	26
3.4. Alat dan Bahan Penelitian.....	28
3.5. Prosedur Percobaan.....	29
3.6. Kondisi Operasi.....	30
3.7. Pengolahan Data.....	31
3.7.1 Tabel Data Pengamatan	31

3.7.2 Koefisien Perpindahan Massa	32
3.7.3 Korelasi Perpindahan Massa	33
3.7.4 Studi Hidrodinamika	34
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1. Studi Perpindahan Massa	35
4.1.1. Pengaruh Jenis Pelarut	36
4.1.2. Pengaruh Laju Alir Pelarut	40
4.1.3. Pengaruh Jumlah Serat	42
4.2. Korelasi Perpindahan Massa	44
4.3. Studi Hidrodinamika	49
4.4. Analisa Sampel	53
5. KESIMPULAN DAN SARAN	55
DAFTAR REFERENSI	57
LAMPIRAN.....	59



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kandungan kimia di setiap bagian tanaman mengkudu (Djauhariya dan Rosman)	7
Tabel 2.2 Aplikasi Kontaktor Membran Serat Berongga.....	20
Tabel 3.1 Tabel pengamatan uji perpindahan massa	31
Tabel 3.2 Tabel uji pengamatan uji hidrodinamika	31
Tabel 4.1 Koefisien dan fraksi kepadatan membran untuk setiap modul	46
Tabel 4.2 Hasil analisa sari buah mengkudu awal dengan GC/MS	53
Tabel 4.3 Hasil analisa sari buah mengkudu setelah absorpsi CO ₂ dengan GC/MS.....	54



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Buah mengkudu (<i>Morinda citrifolia</i>).....	6
Gambar 2.2 Prinsip Absorpsi CO ₂ oleh modul membran (Yan et.al, 2007).....	9
Gambar 2.3 Skema aliran pada modul membran (Li dan Chen, 2005).....	11
Gambar 2.4 Skema Aliran Membran (a) <i>Dead-End</i> dan (b) <i>Cross-flow</i>	11
Gambar 2.5 <i>Porous & Dense Membrane</i>	11
Gambar 2.6 Struktur molekul polipropilen (www.wikipedia.org).....	13
Gambar 2.7 Struktur polipropilen ataktik (www.wikipedia.org).....	13
Gambar 2.8 Struktur polipropilen isotaktik (www.wikipedia.org).....	13
Gambar 2.9 Kontaktor membran serat berongga (Gabelman dan Hwang, 1999)..	16
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	26
Gambar 3.2 Skema alat penelitian	27
Gambar 4.1 Profil konsentrasi CO ₂ dalam kontaktor membran hidrofobik untuk absorpsi CO ₂ (Zhang et. Al, 2006).....	38
Gambar 4.2 Pengaruh jenis pelarut pada absorpsi CO ₂ dengan modul 10 serat dan berbagai variasi laju alir pelarut	38
Gambar 4.3 Pengaruh jenis pelarut pada absorpsi CO ₂ dengan modul 15 serat dan berbagai variasi laju alir pelarut	39
Gambar 4.4 Pengaruh jenis pelarut pada absorpsi CO ₂ dengan modul 20 serat dan berbagai variasi laju alir pelarut	39
Gambar 4.5 Pengaruh laju alir pelarut air terhadap koefisien perpindahan massa pada setiap modul.....	41
Gambar 4.6 Pengaruh laju alir pelarut buah mengkudu terhadap koefisien perpindahan massa pada setiap modul	42
Gambar 4.7 Perbandingan bilangan Reynolds terhadap bilangan Sherwood pada variasi laju alir dan jumlah serat	44
Gambar 4.8 Perbandingan bilangan Reynolds ^b terhadap bilangan Sherwood pada variasi laju alir dan jumlah serat	45
Gambar 4.7 Fraksi kepadatan membran untuk setiap modul.....	46
Gambar 4.10 Hubungan bilangan Reynolds terhadap bilangan Sherwood pada modul dengan serat 10	47
Gambar 4.11 Hubungan bilangan Reynolds terhadap bilangan Sherwood pada modul dengan serat 15	47
Gambar 4.12 Hubungan bilangan Reynolds terhadap bilangan Sherwood pada modul dengan serat 20	48
Gambar 4.13 Profil penurunan tekanan terhadap variasi kecepatan aliran dan jumlah serat	49
Gambar 4.14 Hubungan bilangan Reynolds dengan penurunan tekanan di dalam modul dengan variasi jumlah serat.....	50
Gambar 4.15 Hubungan bilangan Reynolds terhadap faktor friksi.....	51
Gambar 4.16 Hubungan bilangan Reynolds terhadap rasio friksi	52

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Percobaan	59
1.1 Studi Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Air	59
1.1.1 Data Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Air Dengan Jumlah Serat 10.....	59
1.1.2 Data Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Air Dengan Jumlah Serat 15	59
1.1.3 Data Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Air Dengan Jumlah Serat 20.....	60
1.2 Studi Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu	60
1.2.1 Data Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu Dengan Jumlah Serat 10.....	60
1.2.2 Data Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu Dengan Jumlah Serat 15.....	61
1.2.3 Data Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu Dengan Jumlah Serat 20.....	62
1.3 Studi Hidrodinamika Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu	62
1.3.1 Data Hidrodinamika Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu Dengan Jumlah Serat 10.....	62
1.3.2 Data Hidrodinamika Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu Dengan Jumlah Serat 15.....	62
1.3.3 Data Hidrodinamika Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu Dengan Jumlah Serat 20.....	63
Lampiran 2 Contoh Perhitungan	63
2.1 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa.....	63
2.2 Perhitungan Bilangan Reynolds dan Bilangan Sherwood	64
2.3 Perhitungan Hidrodinamika	65
Lampiran 3 Hasil Perhitungan	66
3.1 Hasil Perpindahan Massa Untuk Modul 10 Serat	66
3.2 Hasil Perpindahan Massa Untuk Modul 15 Serat	66
3.3 Hasil Perpindahan Massa Untuk Modul 20 Serat	67
3.4 Hasil Hidrodinamika Untuk Modul 10 Serat	68
3.5 Hasil Hidrodinamika Untuk Modul 15 Serat	68
3.6 Hasil Hidrodinamika Untuk Modul 20 Serat	68
Lampiran 4 Hasil Analisa Sampel Dengan GC/MS	69
4.1 Hasil Analisa Awal Sari Buah Mengkudu	69
4.2 Hasil Analisa Sari Buah Mengkudu Setelah Absorpsi CO ₂	69

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
A	Luas membran serat berongga	m ²
D	Koefisien difusivitas	m ² /s
d _f ; d _{o,fibre}	Diameter luar serat	m
d _s ; d _{i,modul}	Diameter dalam modul	m
d _{equi} ; d _e	Diameter equivalen	m
f	Faktor friksi	-
k; k ₁	Koefisien perpindahan massa	m/s
L _f ; L	Panjang serat/modul	m
n; n _{fiber}	Jumlah serat dalam modul	-
Q _{in}	Laju volumetrik gas CO ₂ input	cc/menit
Q _{out}	Laju volumetrik gas CO ₂ output	cc/menit
Q	Debit pelarut	L/jam
Re	Bilangan Reynolds	-
Sc	Bilangan Schmidt	-
Sh	Bilangan Sherwood	-
T ₁	Temperatur pada kondisi standar	K
T ₂	Temperatur pada kondisi aktual	K
pH	Tingkat keasaman	-
ΔP	Perubahan tekanan	Pa
μ	Viskositas	kg/ms
ρ	Densitas pelarut	kg/m ³

ε	Fraksi kekosongan	-
φ	Fraksi kepadatan membran	-
v_L	Kecepatan linier	m/s



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gas karbondioksida (CO_2) merupakan salah satu gas rumah kaca yang menjadi kontributor utama penyebab pemanasan global (*global warming*). Setengah dari emisi CO_2 diproduksi oleh industri dan *power plant* yang menggunakan bahan bakar fosil (Al-Marzouqi, 2007). Gas karbondioksida juga merupakan gas asam (*sour gas*) yang sangat merugikan bagi industri gas alam. Keberadaan gas CO_2 pada industri gas alam dapat menurunkan nilai bakar (*heating value*) gas alam tersebut dan bersifat korosif, apabila di dalam gas alam tersebut terdapat kandungan uap air. Hal ini disebabkan gas CO_2 bersifat asam sehingga apabila bereaksi dengan air dapat membentuk senyawa asam kuat, yaitu asam karbonat (H_2CO_3) yang dapat merusak bagian dalam peralatan pabrik dan sistem perpipaannya. Gas CO_2 juga dapat membeku pada proses kriogenik (Atcharyawut, 2007).

Teknologi untuk menghilangkan keberadaan gas CO_2 telah banyak dilakukan, berdasarkan variasi proses fisika dan kimia, yaitu absorpsi, adsorpsi, kriogenik, dan teknologi membran. Metode penghilangan CO_2 secara konvensional adalah absorpsi dengan larutan amina menggunakan kolom absorpsi seperti *packed tower*, *spray tower*, dan *bubble column* (Wang, 2004). Namun, kolom konvensional ini memiliki beberapa kelemahan yaitu konsumsi energi yang cukup besar dan memiliki kendala untuk dioperasikan karena sering terjadi berbagai masalah seperti *flooding*, *loading*, *channeling*, *foaming*, dan *entrainment*. (Al-Marzouqi, 2007)

Teknologi membran merupakan teknologi yang tergolong baru dan potensial dalam proses pemurnian dan separasi CO_2 . Teknologi ini bersifat lebih ekonomis karena tidak membutuhkan biaya kapital dan operasional yang tinggi.

Membran yang digunakan sebagai kontaktor gas-cair merupakan membran serat berongga (*hollow fiber membrane*). Membran ini merupakan serat sintesis yang

terbuat dari polimer. Membran ini bersifat hidrofobik agar air tidak membasahi membran saat terjadi proses kontak.

Kontaktor membran serat berongga menggunakan perbedaan konsentrasi sebagai gaya dorong (*driving force*). Kontak yang terjadi antara fasa cair dan gas bersifat non-dispersif, artinya tidak terjadi kontak secara langsung antara pelarut dengan CO₂ sehingga proses regenerasi pelarut lebih mudah dilakukan. Untuk mencegah terjadinya kontak langsung antara kedua fasa, maka pelarut dialirkan pada sisi membran sedangkan fluida yang memiliki komponen yang akan dihilangkan dialirkan pada sisi membran lainnya. Keuntungan-keuntungan yang didapat dari kontaktor membran serat berongga adalah (Li, 2005):

- Bersifat fleksibel dalam proses operasional karena laju alir gas dan cairan dapat divariasikan secara bebas sehingga berbagai kendala dalam proses operasional membran seperti *flooding*, *foaming*, dan *entrainment* dapat dicegah.
- Bersifat lebih ekonomis karena konsumsi energi yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan kolom konvensional.
- Luas permukaan kontak relatif lebih besar dibanding luas permukaan pada kontaktor konvensional sehingga proses absorpsi lebih efektif.
- *Hold up* pelarutnya rendah, sangat atraktif untuk pelarut yang mahal.
- *Scale-up* dapat dilakukan dengan mudah karena modul membran fleksibel untuk disusun.
- Mudah untuk memprediksi kinerja kontaktor membran karena wilayah interfacial konstan dan tidak bergantung pada kondisi operasi seperti suhu dan tekanan.

Pada penelitian ini, fasa cair yang digunakan sebagai kontaktor gas-cair pada proses pemisahan CO₂ dengan menggunakan membran serat berongga adalah pelarut dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) dengan dosis 100 gram buah mengkudu per liter air. Kriteria pemilihan absorben cair adalah (Li, 2005):

1. Tegangan permukaan

Pelarut dengan tegangan permukaan yang rendah cenderung untuk meresap ke dalam pori-pori membran sehingga membran akan terbasahi. Idealnya pelarut tidak dapat membasahi membran dimana pori-pori membran terisi oleh gas meskipun pada tekanan pelarut yang tinggi. Hambatan perpindahan massa pada kondisi tidak terbasahi lebih kecil dibandingkan kondisi basah sehingga pada kondisi tidak terbasahi akan memiliki laju perpindahan massa yang lebih besar daripada kondisi terbasahi.

Larutan yang digunakan berasal dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) dan air dengan dosis 100 gram buah mengkudu per liter air. Oleh karena itu pelarut buah mengkudu disini diasumsikan memiliki kecenderungan sifat seperti air dimana air itu sendiri memiliki tegangan permukaan yang tinggi sehingga cenderung tidak akan membasahi membran.

2. Kesesuaian sifat kimia pelarut dengan material membran.

Kesesuaian sifat kimia pelarut merupakan faktor penting yang menentukan stabilitas dan umur pemakaian dari modul membran.

3. Tekanan uap rendah dan stabilitas termal yang baik.

Jika pelarut bersifat *volatile* maka uapnya akan mengisi pori-pori membran dan masuk ke dalam fasa gas sehingga dapat meningkatkan hambatan perpindahan massa keseluruhan. Hal ini menyebabkan pelarut dengan tekanan uap yang rendah lebih disukai. Selain itu, pelarut juga harus memiliki kestabilan secara termal dan kimiawi yang baik pada temperatur yang tinggi sehingga tidak mudah terdegradasi akibat suhu tinggi.

Dasar pemisahan CO₂ dengan menggunakan membran serat berongga adalah berdasarkan perbedaan permeabilitas terhadap membran. Mekanisme perpindahan massa pada proses absorpsi CO₂ menggunakan membran serat berongga meliputi proses absorpsi secara fisika dan absorpsi secara kimia. Prinsip absorpsi secara fisik

yaitu melarutkan CO₂ secara fisik tanpa disertai reaksi kimia ke dalam pelarutnya yang dipengaruhi oleh difusivitas CO₂ ke dalam air. Sedangkan absorpsi secara kimia meliputi reaksi kimia, yaitu CO₂ yang diserap oleh pelarut juga dapat turut bereaksi secara kimia.

Keunggulan buah mengkudu sebagai pelarut alam diantaranya bersifat ramah lingkungan sehingga aman digunakan, tidak korosif dan lebih murah dibandingkan MEA, DEA ataupun MDEA. Penggunaan pelarut alam dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) bertujuan untuk mengetahui potensi buah mengkudu sebagai absorben bagi CO₂ dan mengamati efektivitas perpindahan massa dan studi hidrodinamikanya. Air, dilihat dari sisi hidrodinamika dan sisi perpindahan massanya, dijadikan sebagai dasar untuk membandingkan efektivitas proses penyerapan CO₂ pada kontaktor membran serat berongga.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimanakah kemampuan pelarut dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) sebagai absorben CO₂ dengan menggunakan kontaktor membran serat berongga?
2. Bagaimanakah efektivitas dari kontaktor membran serat berongga untuk mengabsorpsi CO₂ dengan absorben dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*)?
3. Bagaimanakah pengaruh variasi laju alir dan jumlah serat terhadap efektivitas dari kontaktor membran serat berongga?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk:

1. Mengetahui seberapa besar potensi buah mengkudu untuk digunakan sebagai absorben gas CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga.
2. Mengevaluasi efektivitas dari kontaktor membran serat berongga dalam proses absorpsi CO₂ menggunakan pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*).

3. Mengevaluasi pengaruh variasi laju alir dan jumlah serat terhadap perpindahan massa dan hidrodinamika absorpsi CO₂ oleh larutan buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) melalui kontakor membran serat berongga.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, penulis membatasi masalah sebagai berikut:

1. Menggunakan modul membran serat berongga yang terbuat dari polipropilen sebagai kontakor gas-cair.
2. Menggunakan pelarut air dan pelarut dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) sebagai absorben bagi gas CO₂.
3. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah laju alir air dan pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) dan jumlah serat di dalam modul.
4. Variabel tetap dalam penelitian ini adalah konsentrasi input dan output CO₂ murni, diameter membran, panjang modul, serta diameter selongsong modul.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

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

BAB II Tinjauan Pustaka

Berisi dasar-dasar teori yang digunakan untuk menjelaskan masalah.

BAB III Metode Penelitian

Berisi tentang metode yang digunakan dalam penelitian ini.

BAB IV Hasil dan Pembahasan

Berisi analisis dan pembahasan dari hasil penelitian berupa data yang diperoleh.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Berisi tentang kesimpulan dari analisis dan pembahasan dari hasil penelitian.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mengkudu (*Morinda citrifolia*)

Mengkudu merupakan tanaman asli dari Indonesia. Mengkudu adalah tanaman yang bersifat serba guna dan mempunyai nilai ekonomis. Dalam semua bagian tanaman mengkudu terdapat berbagai macam senyawa kimia yang berguna bagi kesehatan manusia. Pembiakan mengkudu dilakukan dengan biji dan dapat berbuah setelah 4 – 5 tahun. Gambar buah mengkudu dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Buah mengkudu (*Morinda citrifolia*)

Mengkudu dapat dimanfaatkan sebagai berikut:

1. Tanaman obat

Mengkudu mengandung zat-zat *terpenoid* yang dapat membantu tubuh dalam proses sintesa organik dan pemulihan sel-sel tubuh, *xeronine* yang berfungsi untuk mengaktifkan enzim-enzim dan mengatur fungsi protein di dalam sel, dapat mengetahui kandungan zat-zat antikanker (*damnacanthal*), dan zat-zat lainnya yang bermanfaat untuk kesehatan manusia.

2. Zat pewarna

Kulit akar tanaman mengkudu mengandung zat pewarna (merah), yang diberi nama *morindon* dan *morindin*.

3. Pelarut

Mengkudu berpotensi sebagai absorben bagi CO₂. Hal ini dikarenakan larutan buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) memenuhi kriteria sebagai absorben cair seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Tabel 2.1 menunjukkan kandungan kimia pada setiap bagian tanaman mengkudu.

Tabel 2.1 Kandungan kimia di setiap bagian tanaman mengkudu (Djauhariya dan Rosman)

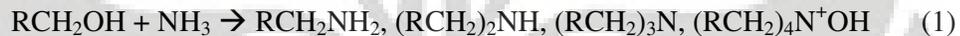
Bagian tanaman	Kandungan kimia
Pada seluruh bagian	<i>Alizarin, alizarin-alfa-metil eter, antraquinon, asperulosida, asam hexanoat, morindadiol, morindon, morindogenin, asam oktanoat, asam ursolat,</i>
Daun	Asam amino (<i>alanin, arginin, asam aspartat, sistein, sistin, glisin, asam glutamat, histidin, leusin, isoleusin, metionin, fenilalamin, prolin, serin, threonin, triptopan, tirosin, valin</i>), mineral (<i>kalsium, besi, fosfor</i>) vitamin (<i>asam askorbat, beta caroten, niasin, riboflavin, tiamin, betasitosterol, asam ursolat</i>), alkaloid (<i>antraquinon, glikosida, resin</i>).
Bunga	<i>5,7-dimetil-apigamin-4-o-beta-d(+)-galaktopiranosida, 6,8-dimetoksi-3-metil-antraquinon-1-o-beta-rammosil-glukopiranosida, acasetin-7-o-beta-d(+)-glukopiranosida</i>
Bagian tanaman	Kandungan kimia
Buah	<i>Asam askorbat, asam asetat, asperulosida, aambutanoat, asam benzoat, benzil alkohol, 1-butanol, asam kaprilat, asam dekanat, (E)-6-dodekeno-gamma-laktona, (z,z,z)-8, 11,14-asamekosatri-noat, asam elaidat, etil dekanat, etil-ektanoat, etil benzena, eugenol, eugenol, glukosa, asam heptanoat, 2-heptanon, hexanal, hexamamida, asam hexaneudioat, asam hexanoat, 1-hexanol, 3-butan-1-ol, metil dekanat, metil elaidat, metil hexanoat, metil-3-metil-tio-propanoat, metil oktanoat, metil oleat, metil palmitat, Scopoletin, asam undekanoat, (z,z)-2,5-undekadin-1-ol, vomifol. Ascubin, Lasperuloside, alizarin, antraquinon, proxeronin, Dammacanthal.</i>
Akar	<i>Asperulosids, dannachantal, morindadiol, morindin, morindon, nordannacantal, rubiadin, rubiadin monometil eter, soranjidiol, antraquinon, glikosida, zat getah, resin, sterol</i>
Kulit	<i>Alizarin, klororubin, glikosida, (pentosa, hexosa), morindadiol, morindanigrin, morindin, morindon, zat resin, rubiadin monometil eter, soranjidiol</i>
Kayu	<i>Antraagalol-2, 3-dimetil eter</i>

Sumber : Aalbersberg (1993), Bushnel *et al.* (1950), Hiramatsu *et al.* (1993), Solomon (1998), Waha (2001)

Pada bagian buah mengkudu terdapat komponen-komponen kimia yang diprediksi dapat memicu proses absorpsi, yaitu:

1. Golongan alkohol

Jenis-jenis alkohol yang terdapat dalam buah mengkudu di antaranya benzil alkohol, 1-butanol, 1-hexanol, 3-butan-1-ol, (z,z)-2,5-undekadin-1-ol, dan vomifol. Oleh karena alkohol mudah disintesis dan mudah ditransformasikan menjadi senyawa lain maka alkohol menjadi senyawa *intermediate* yang penting dalam mensintesis senyawa organik. Pada industri, metode yang banyak digunakan untuk menghasilkan amina adalah dengan mereaksikan alkohol dengan ammonia pada temperatur yang tinggi. Amina yang dihasilkan dapat berupa amina primer, sekunder, atau pun tersier. Reaksi yang terjadi adalah:



Pada industri, jenis absorben komersial yang efektif untuk mengabsorpsi CO₂ adalah MEA dan MDEA yang memiliki gugus amina. Diharapkan dengan keberadaan golongan alkohol ini maka pelarut dari buah mengkudu ini dapat digunakan untuk mengabsorpsi CO₂.

2. Golongan ester

Jenis-jenis ester yang berada dalam buah mengkudu di antaranya etil dekanoat, etil-ektanoat, metal dekanoat, metal elaidat, metal hexanoat, metil-3-metil-tio-propanoat, dan metil oktanoat. Ester dapat direduksi menjadi golongan alkohol sehingga keberadaan senyawa ester ini diharapkan dapat memicu proses absorpsi yang diinginkan.

3. Golongan amida

Senyawa amida yang terdapat dalam buah mengkudu adalah hexanamida. Golongan amida ini memiliki gugus fungsi -NHR yang bersifat basa sehingga diharapkan dapat digunakan untuk mengabsorpsi CO₂.

Kelebihan mengkudu sebagai absorben di antaranya adalah sebagai berikut:

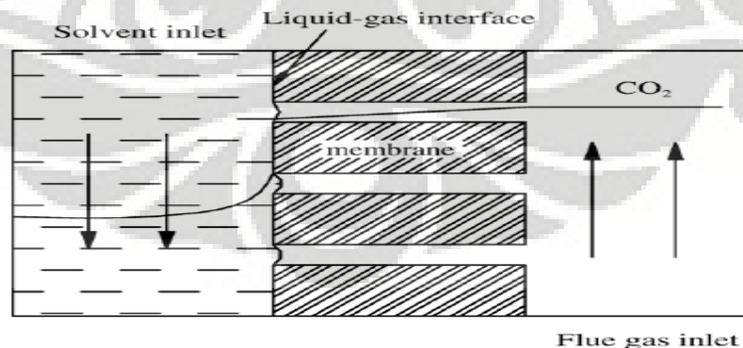
1. Melimpah karena mudah didapat dan bersifat ramah lingkungan.

2. Tidak korosif dan harganya lebih murah dibandingkan menggunakan pelarut kimiawi seperti MEA, DEA, dan MDEA.

2.2 Absorpsi CO₂

Proses absorpsi merupakan suatu proses perpindahan yang melibatkan satu zat atau lebih dari fasa gas ke fasa cair. Perpindahan massa ini dipengaruhi oleh difusi. Laju difusi ini secara langsung dipengaruhi oleh perbedaan konsentrasi zat pada fasa gas dengan fasa cair. Secara umum proses absorpsi dibagi menjadi dua, yaitu absorpsi fisika dan absorpsi kimia. Pada absorpsi fisika, gas CO₂ dapat larut secara fisik dalam fasa cair sedangkan pada absorpsi kimia gas CO₂ yang terlarut juga dapat bereaksi secara kimiawi dalam fasa cair. Laju absorpsi pada proses absorpsi fisika dipengaruhi oleh difusibilitas dan solubilitas fasa gas yang terlarut ke dalam fasa cair sedangkan laju absorpsi pada absorpsi kimia dipengaruhi oleh reaksi kimia.

Absorpsi CO₂ dengan menggunakan membran didasarkan atas terjadinya kontak gas-cair melalui membran mikroporos yang hidrofobik. Membran ini membentuk penghalang yang *permeable* antara fasa gas dan fasa cair sehingga perpindahan massa yang terjadi tidak disertai dengan dispersi antara satu fasa dengan fasa yang lainnya. Dinding dari membran hidrofobik berfungsi untuk memisahkan fasa gas dengan fasa cair namun komponen gas akan berdifusi melalui pori membran dan bagian membran yang lain dan terabsorpsi ke dalam fasa cair. Ilustrasi absorpsi CO₂ oleh membran dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Prinsip absorpsi CO₂ oleh membran (Yan et.al, 2007)

2.3 Teknologi Membran

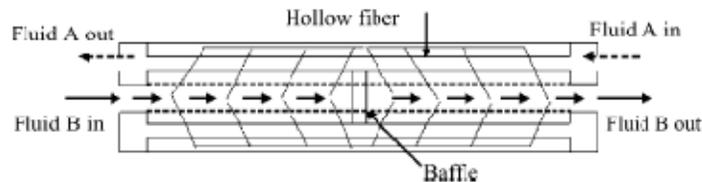
Teknologi membran merupakan teknologi yang potensial dalam proses separasi CO₂. Berbagai industri telah mengaplikasikan teknologi membran untuk proses separasi. Teknologi membran bersifat lebih ekonomis dan efisien dibandingkan teknologi absorpsi konvensional. Dibandingkan teknologi konvensional, luas permukaan kontak pada membran lebih besar sehingga proses separasi akan lebih efektif.

2.3.1 Membran

Membran adalah suatu penghalang selektif di antara dua fasa, dimana suatu molekul dapat melalui membran sedangkan molekul lainnya tidak. Hal ini akibat adanya perbedaan ukuran pori membran, sifat molekul tersebut ataupun karena sifat membran itu sendiri. Laju perpindahan molekul pada membran ditentukan oleh permeabilitasnya di dalam membran dan dikarenakan adanya gaya pendorong (*driving force*).

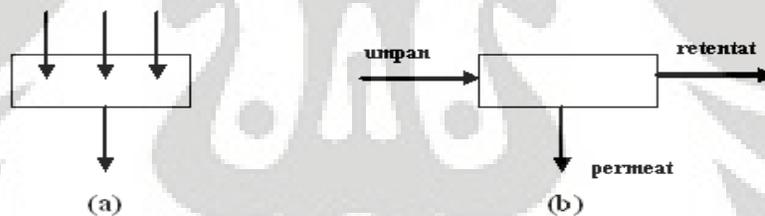
Pada fasa cair, konsentrasi karbondioksida terlarut akan mengalami penurunan yang signifikan karena adanya tahanan pada cairan. Pada membran dan fasa gas, penurunan konsentrasi karbondioksida jauh lebih kecil karena pada membran terdapat dua tahanan yaitu tahanan gas yang berada di mulut pori membran dan tahanan membran itu sendiri sedangkan pada fasa gas terdapat tahanan pada fasa gas.

Laju perpindahan molekul pada membran ditentukan oleh permeabilitasnya di dalam membran dan adanya gaya penggerak (*driving force*). 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. Besar laju perpindahan komponen-komponen 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. Ilustrasi aliran pada modul membran dapat dilihat pada Gambar 2.3.



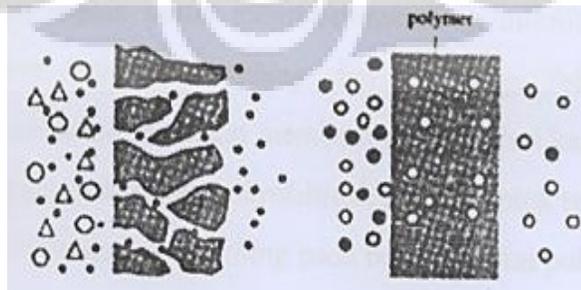
Gambar 2.3 Skema aliran pada modul membran (Li dan Chen, 2005)

Secara umum jenis aliran umpan melalui membran dapat dibedakan menjadi dua yaitu aliran *dead end* dan aliran *cross flow*. Aliran *dead-end* adalah jenis aliran dimana aliran umpan tegak lurus dengan membran dan tidak terdapat aliran keluaran partikel yang tertolak membran sehingga akan menyebabkan akumulasi pada permukaan membran yang semakin lama semakin tebal dan mengakibatkan terbentuknya *cake* yang dapat mengakibatkan laju permeasi berkurang. Sedangkan aliran *cross flow* yakni jenis aliran dimana aliran umpan sejajar dengan permukaan membran. Aliran ini paling sering digunakan di industri karena lebih fleksibel dan pencucian membran tidak terlalu sering. Jenis-jenis aliran pada membran dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Skema Aliran Membran (a) *Dead-End* dan (b) *Cross-flow*

Berdasarkan karakteristik dan selektivitasnya, membran dibagi dua jenis yaitu membran berpori (*porous membrane*) dan membran tidak berpori (*dense membrane*). Jenis-jenis membran dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 *Porous & Dense Membrane*

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

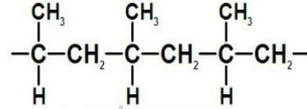
1. Mikropori : ukuran pori membran $< 2\text{nm}$
2. Mesopori : ukuran pori membran antara $2 - 50\text{ nm}$
3. Makropori : ukuran pori membran $> 50\text{ nm}$

Material yang bersifat hidrofobik seperti PTFE (Polytetrafluoroethylene) dan isotaktik Polipropilen (PP) sering dibuat menjadi membran mikrofiltrasi. PTFE memiliki stabilitas termal dan kimia yang sangat baik, kristalinitas yang tinggi, dan tidak larut dalam pelarut biasa. Polipropilen (PP) dalam bentuk isotaktik memiliki sifat tahan terhadap pelarut. Konfigurasi isotaktik berbentuk kristal sedangkan konfigurasi staktik berbentuk amorf. Keduanya 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. Membran PTFE dapat menghasilkan penampilan yang lebih baik pada sistem absorpsi gas oleh membran dibandingkan PP, namun membran jenis ini memerlukan biaya yang tinggi (deMontigny et. al, 2006).

2.3.2 Membran Polipropilen

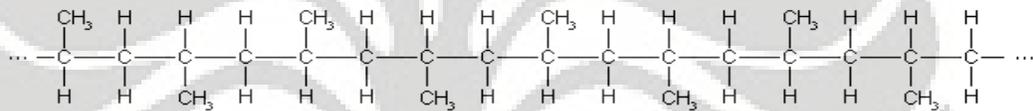
Membran yang digunakan dalam penelitian ini ialah membran polipropilen yang merupakan membran sintetik yang terbuat dari salah satu jenis polimer, yaitu polipropilen. Penggunaan polipropilen sebagai membran pada penelitian ini berdasarkan pada sifat hidrofobik yang dimilikinya sehingga air tidak bisa membasahi membran secara spontan (Mulder, 1997). Selain itu, polipropilen memiliki kristalinitas yang tinggi (dalam konfigurasi isotaktik) yang membuat polipropilen memiliki stabilitas kimia yang baik. Karena dengan terdapatnya kristalit-kristalit pada matriks polimer, polipropilen menjadi cukup sulit untuk melarutkan zat (*insoluble*) dan reagen-reagen kimia agak sulit untuk masuk ke dalamnya. Polipropilen sendiri memiliki titik leleh yang cukup tinggi yaitu 160°C

(320°F) yang menyebabkan polipropilen memiliki stabilitas termal yang baik. Struktur molekul polipropilen ditunjukkan pada Gambar 2.6.



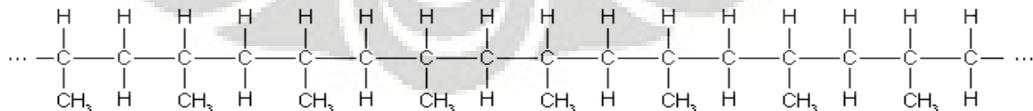
Gambar 2.6 Struktur molekul polipropilen (www.wikipedia.org)

Polipropilen ataktik merupakan polimer yang lemah karena polimer yang terbentuk merupakan bentuk amorf dengan susunan rantai yang tidak beraturan. Lain halnya dengan polipropilen isotaktik dimana memiliki susunan rantai yang teratur, yaitu semua cabang metil terdapat pada sisi rantai yang sama. Struktur molekul polipropilen ataktik ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Struktur polipropilen ataktik (www.wikipedia.org)

Polipropilen isotaktik akan memiliki karakteristik yang kuat karena memiliki bentuk kristal. Akan tetapi, gugus metil pada samping polipropilen dapat mempengaruhi beberapa aspek kimia seperti karbon tersier menyebabkan polipropilen menjadi kurang stabil jika terdapat oksigen karena mudah teroksidasi. Dengan kata lain perbedaan susunan rantai pada polipropilen akan mempengaruhi karakteristik dari polipropilen itu sendiri. Struktur molekul polipropilen isotaktik ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Struktur polipropilen isotaktik (www.wikipedia.org)

Sifat-sifat dari polipropilen isotaktik diantaranya adalah :

1. Memiliki densitas yang lebih kecil (0,9 gr/cm³)

2. Memiliki tingkat kekuatan yang tinggi
3. Mempunyai *softening point* yang lebih tinggi dan dapat dipakai pada suhu yang tinggi
4. Polipropilen terhindar dari proses *cracking* oleh lingkungan, kecuali jika terdapat sulfur dan asam kromat

2.4 Kontaktor Membran

Kontaktor membran adalah suatu alat yang melibatkan proses perpindahan massa gas-cair atau cair-cair tanpa terjadi dispersi antar fasa. Kontaktor membran sangat efektif untuk memisahkan atau menambahkan gas ke dalam air. Desain kontaktor yang baik dapat memaksimalkan koefisien perpindahan massa dan menurunkan *pressure drop*. Fungsi utama dari kontaktor membran adalah (Sengupta et.al, 1998):

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

Proses pemisahan ditentukan dari koefisien distribusi dari komponen dalam dua fasa dan membran sebagai alat penghubung. Secara umum membran tidak meningkatkan perpindahan massa tapi meningkatkan luas area per volume. Sebagai contoh *packed and tray column* memiliki luas area per volume sekitar 30-300 m²/m³ tetapi dengan kontaktor membran, luas area per volumenya dapat mencapai 1600 – 6600 m²/m³. Keuntungan lainnya adalah dapat menghilangkan *flooding* dan *unloading* serta fasa yang terdispersi. Berbeda dengan sistem separasi lainnya, kontaktor membran dapat memberikan perpindahan massa secara keseluruhan. Akan tetapi ketidakstabilan sistem ini dapat menjadi masalah, misalkan saja jika tekanan yang diberikan melebihi kemampuan membran, maka membran akan rusak dan fluida akan bercampur.

Suatu perbedaan fasa gas-cair dan cair-cair akan terbentuk dalam kontaktor membran dan akan terpisah secara baik oleh kontaktor membran. Dalam cair-cair semua fasa ialah cairan, sedangkan dalam gas-cair kontaktor satu fasa yaitu gas

atau uap dan fasa lain adalah cairan. Kontaktor membran gas-cair dapat mengatur proses gas atau uap yang akan dipindahkan dari fasa cair ke fas gas.

2.4.1 Kontaktor Membran Gas-Cair

Kontaktor membran ini umumnya digunakan untuk oksigenasi darah yang disebut oksigenator dimana oksigen murni atau udara dialirkan pada salah satu sisi membran, dan darah mengalir pada sisi yang lain. Dalam hal ini oksigen akan terdifusi ke dalam darah dan CO₂ akan terdifusi dari darah ke fasa gas.

Jika menggunakan membran hidrofobik, maka bahan membran dapat berupa politetraflouroetilen, polietilen, maupun polipropilen dimana membran tidak menyerap air. Bagian membran berpori akan diisi dengan fasa gas. Cairan tidak akan melebihi tekanan dari membran.

Jika membran hidrofilik dipakai sebagai fasa cairnya, maka membran akan terbasahi oleh cairan. Kontaktor membran ini juga dapat dipakai untuk perpindahan oksigen dari sistem fermentasi, *aerobic wastewater treatment*, dan lain-lain selain untuk oksigenasi darah. Pada kasus ini, fasa umpan dan fasa membran adalah fasa gas dan fasa permeat adalah fasa cair. Ketika oksigen dipindahkan dari air dengan proses desorpsi nitrogen, fasa umpan adalah fasa cair dan fasa permeat adalah fasa gas.

2.4.2 Kontaktor Membran Cair-Cair

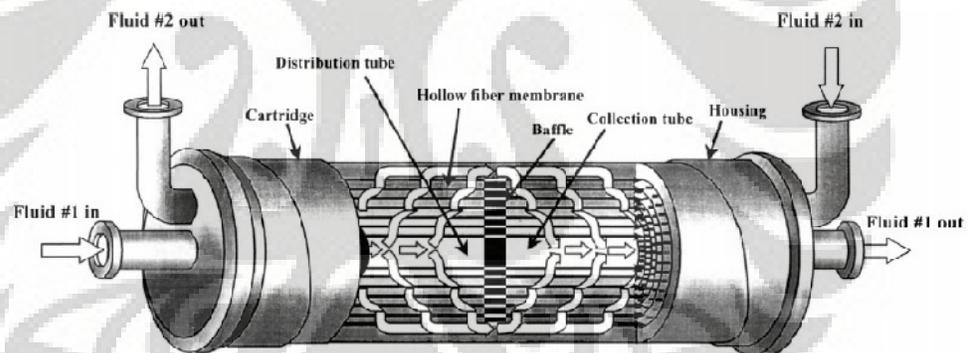
Kontaktor membran jenis ini mempunyai karakteristik pemisahan dua cairan dengan menggunakan membran berpori dan membran tidak berpori. Pada membran berpori, fasa umpan mungkin membasahi membran namun dapat juga tidak membasahi membran. Jika umpan adalah pelarut organik dari suatu campuran, maka fasa permeat yang dipindahkan adalah fasa cairan. Jika membran bersifat hidrofobik, maka membran akan terbasahi dan penyerap akan terisi. Pada sisi permeat, aliran akan dipompakan tapi tidak membasahi membran dan tidak akan tercampur dengan pelarut organik.

2.4.3 Kontaktor Membran Serat Berongga

Kontaktor membran serat berongga merupakan teknologi proses membran yang relatif baru. Kontaktor membran serat berongga menggunakan membran

serat berongga (*hollow fiber*) sebagai pemisah antar fasa yang satu dengan fasa yang lainnya.

Modul membran serat berongga mirip dengan modul kapiler tetapi berbeda dimensi. 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 dibentuk menjadi bundel dan dilipat setengah dengan konfigurasi kepadatan pengepakan yang tertinggi hingga mencapai $30000 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Distribusi air umpan berupa tabung plastik perforasi (*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 dari penggabungan ini disebut permeator. Gambar 2.9 menunjukkan kontaktor membran serat berongga.



Gambar 2.9 Kontaktor membran serat berongga (Gabelman dan Hwang, 1999)

Keunikan dari kontaktor membran serat berongga yakni 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 besar di dalam modul sehingga perpindahan massa yang terjadi lebih efisien dan untuk membuat fasa kontak gas cair pada pori membran tidak bergerak dengan kombinasi efek tegangan permukaan dan perbedaan tekanan pada tiap fasa.

Berbeda dengan teknologi separasi konvensional yang bergantung pada dua fasa yang akan dikontakkan, teknologi dengan kontaktor membran bersifat non-dispersif sehingga tidak ada ketergantungan antara fluida-fluida yang dikontakkan. Ketergantungan terhadap antara dua fasa yang akan dikontakkan akan menyebabkan pembentukan emulsi, gelembung, dan banjir.

Keuntungan kontaktor membran serat berongga sebagai kontaktor gas-cair dibandingkan dengan peralatan separasi konvensional antara lain (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. Luas permukaan kontak dapat diketahui jumlahnya dan cenderung konstan sehingga prediksi performansi lebih mudah dilakukan daripada separasi konvensional. Selain itu pada kontakor dispersi luas permukaan kontak sulit ditentukan karena distribusi gelembung atau ukuran *droplet* bergantung pada kondisi operasi dan sifat fluida yang mana menyulitkan dalam perhitungan perpindahan massa seperti menentukan koefisien perpindahan massa dan luas permukaan kontak gabungan (K_{Ga} , K_{La}). Jika menggunakan kolom ber-*packing*, luas permukaan kontak per unit volume mungkin dapat diketahui namun terkadang sulit untuk menentukan *loading* seperti seberapa besar fraksi aktual yang dapat digunakan dari permukaan kontak yang ada.
10. Kontakor membran juga dapat meningkatkan batas konversi kesetimbangan reaksi kimia dengan proses sirkulasi kandungan reaktor melalui kontakor menggunakan pelarut ekstraksi atau gas desorpsi produk dapat diambil sehingga reaksi kesetimbangan akan bergeser ke arah kanan (produk).
11. Kondisi operasi bebas makroba (*aseptic operation*) mungkin dapat diterapkan dimana menguntungkan untuk proses fermentasi.
12. Kontakor membran tidak memiliki bagian yang bergerak sehingga memudahkan perawatan dan pemeliharaannya.
13. 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.

Sedangkan kekurangan dari kontaktor membran adalah sebagai berikut (Gabelman dan Hwang, 1999):

1. Membran memiliki umur tertentu sehingga biaya periodik pergantian membran juga perlu diperhitungkan.
2. Hanya dapat beroperasi pada rentang temperatur yang tidak terlalu tinggi karena dapat merusak membran khususnya membran polimer.
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. Tidak tahan terhadap kondisi yang terlalu asam atau basa khususnya membran polimer.
6. 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 diturbuliskan.
7. Pemakaian adesif atau perekat seperti epoksi untuk menahan buntelan fiber pada *tube* kemungkinan mudah rusak oleh pelarut organik.

2.4.4 Aplikasi Kontaktor Membran Serat Berongga

Kontaktor membran serat berongga telah banyak diteliti untuk diaplikasikan dalam industri. Hal ini dikarenakan keuntungan yang diperoleh apabila menggunakan kontaktor membran serat berongga.

Secara garis besar aplikasi kontaktor membran serat berongga di industri dapat dikategorikan menjadi berbagai jenis proses seperti yang dijelaskan pada Tabel 2.2 di bawah ini:

Tabel 2.2 Aplikasi Kontaktor Membran Serat Berongga (Kartohardjono, 2004)

Aplikasi	Aliran Fluida	Bahan Membran	Laju Pengontrol Proses	Aplikasi di industri
Oksigenasi air	Selongsong: air Lumen: gas/udara	Pori mikro hidrofobik	Lapisan cairan	Pengolahan air Iimbah
Deoksigenasi air	Selongsong: air Lumen: nitrogen/vakum	Pori mikro hidrofobik atau 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 Iimbah	Selongsong: air/desikan cair Lumen: gas/udara	Pori mikro hidrofobik atau membran berat	Lapisan cairan	Pengolahan air Iimbah
Humidifikasi / dehumidifikasi udara	Selongsong: air Lumen: udara	Pori mikro hidrofobik	Lapisan cairan dan tahanan membran	

2.4.5 Studi Perpindahan Massa pada Kontaktor Membran Serat Berongga

Perpindahan karbondioksida ke dalam pelarut dipengaruhi oleh koefisien perpindahan massa dan gaya penggerak dari perpindahan massa ini. Aliran pada fasa gas adalah CO₂ murni sehingga lapisan batas pada fasa gas dapat diabaikan. Selain itu membran yang digunakan bersifat hidrofobik, artinya pori-pori membran hanya akan terisi oleh gas sehingga tahanan gas pada membran untuk perpindahan gas juga dapat diabaikan. Oleh karena itu tahanan utama perpindahan massa berada pada fasa cair dan koefisien perpindahan massa dapat diperkirakan dari koefisien perpindahan massa fasa cair dan bersifat *independent* terhadap laju alir gas. Pada kontaktor membran untuk aplikasi absorpsi gas-cair, selama pori membran terisi oleh gas, koefisien perpindahan massa overall hanya akan bergantung pada koefisien perpindahan massa fasa cair. (Wickramasinghe, 2002)

Prinsip metode yang digunakan untuk mengetahui perpindahan massa yang terjadi dalam proses absorpsi gas-cair adalah dengan mengamati perbedaan laju alir gas sebelum melewati modul dan setelah melewati modul membran. Untuk menghitung nilai koefisien perpindahan massa, digunakan persamaan sebagai berikut:

$$k_1 = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{A_m} \quad (2.2)$$

Dengan k_1 adalah koefisien perpindahan massa dalam satuan sccm, Q_{in} adalah laju alir volumetric gas CO₂ input dalam satuan sccm, Q_{out} adalah laju alir volumetrik gas CO₂ output modul membran dalam satuan sccm, A_m adalah luas kontak modul membran dalam satuan m².

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

$$Sh = a Re^b Sc^c \quad (2.3)$$

Dengan Sh adalah bilangan Sherwood, Re adalah bilangan Reynolda, dan Sc adalah bilangan Schmidt. Rumus ketiga bilangan tak berdimensi tersebut adalah:

$$Sh = k \frac{d_e}{D} \quad (2.4)$$

Dengan Sh adalah bilangan Sherwood, k adalah koefisien perpindahan massa dalam satuan m/s , d_e adalah diameter ekuivalen dalam satuan m , dan D adalah difusivitas pelarut dalam satuan m^2/s .

$$Re = \frac{\rho \cdot v_l \cdot d_e}{\mu} \quad (2.5)$$

Dengan Re adalah bilangan Reynolds, ρ adalah massa jenis dari pelarut dalam satuan kg/m^3 , v_l adalah viskositas kinematik dalam satuan m/s , d_e adalah diameter ekuivalen dalam satuan m , dan μ adalah viskositas dari pelarut dalam satuan kg/ms .

$$Sc = \frac{v_l}{D} \quad (2.6)$$

Dengan Sc adalah bilangan Schmidt, v_l adalah viskositas kinematik dalam satuan m/s , dan D adalah difusivitas pelarut m^2/s .

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

$$\epsilon = 1 - n_{fiber} \left(\frac{d_{o,fiber}}{D_{i,modul}} \right)^2 \quad (2.7)$$

Dengan $d_{o,fibre}$ adalah diameter serat dalam satuan m , $D_{i,modul}$ adalah diameter selongsong modul dalam satuan m , dan n_{fibres} adalah jumlah serat di dalam modul.

Laju alir yang mengalir pada bagian selongsong di sekitar serat dapat dianalogikan serupa dengan laju alir yang mengalir pada bagian selongsong yang diakibatkan oleh dua silinder kosentris yang memiliki $d_{o,fibre}$ dan $d_{ekuivalen}$.

Diameter ekuivalen ini dihitung dari persamaan:

$$d_e = \frac{d_{o,fiber}}{\sqrt{1-\epsilon}} \quad (2.8)$$

Dengan d_e adalah diameter ekuivalen dalam satuan m, $d_{0, \text{fibre}}$ adalah diameter serat dalam satuan m, dan ϵ adalah faktor kekosongan di dalam modul.

2.4.6 Studi Hidrodinamika pada Kontaktor Membran Serat Berongga

Hidrodinamika merupakan pembelajaran tentang sifat atau kondisi fluida saat bergerak. Pada penelitian ini kinerja dari membran dipengaruhi oleh faktor-faktor yang berhubungan dengan hidrodinamika, antara lain faktor friksi, penurunan tekanan dan bilangan Reynolds.

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 Reynolds. Studi ini mempelajari karakteristik dan hubungan 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 :

$$f = \frac{\epsilon(D_o^2 - D_i^2)\Delta P}{4d_o L_f \left(\frac{1}{2}\right)\rho v^2} = \frac{d_e \Delta P}{2L_f \rho v^2} \quad (2.9)$$

Faktor friksi dalam literatur untuk aliran laminar ($Re < 2000$) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (2.10)$$

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

$$f = \frac{0,0791}{Re^{1/4}} \quad (2.11)$$

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Pendahuluan

Proses absorpsi karbondioksida dengan menggunakan pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) bertujuan mengetahui potensi buah mengkudu sebagai absorben CO₂ dan untuk mengevaluasi efektivitas kontaktor membran serat berongga sebagai media kontak. Dalam penelitian ini pelarut yang digunakan adalah larutan dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*). Penggunaan pelarut alami untuk absorpsi CO₂ dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) merupakan sebuah inovasi baru karena pelarut dari bahan alam bersifat ramah lingkungan dibandingkan pelarut dari bahan kimia seperti MEA, DEA atau pun MDEA. Penelitian ini mempelajari perpindahan massa yang terjadi pada membran dan studi hidrodinamika dalam rangka mengevaluasi efektivitas kontaktor membran serat berongga.

3.2 Diagram Alir Penelitian

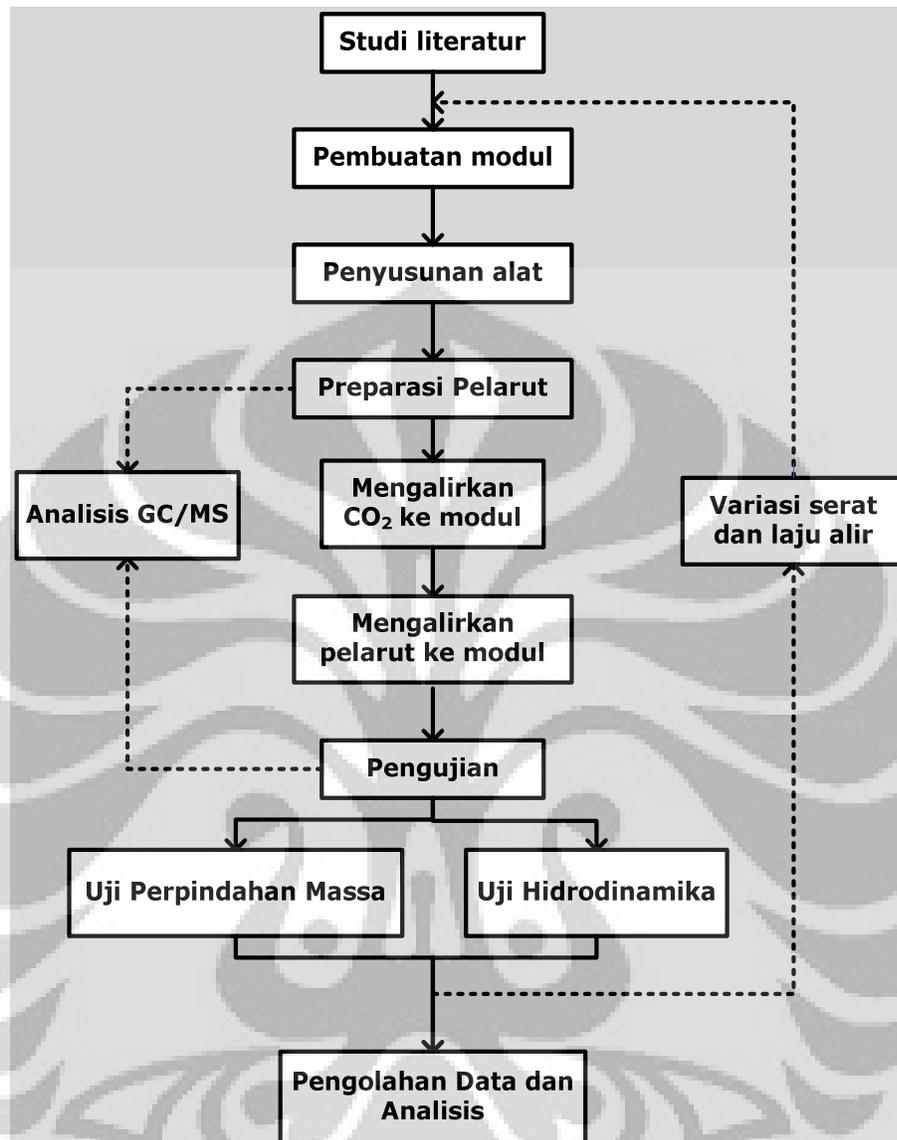
Alur proses pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1. Persiapan pada penelitian ini diawali dengan melakukan studi literatur dan pembuatan modul. Studi literatur dilakukan dengan mencari referensi mengenai kandungan kimiawi dalam buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) dan kontaktor membran serat berongga baik dari buku, jurnal, maupun artikel dari internet. Berikutnya adalah membuat modul. Modul serat disusun dengan menyerupai bentuk selongsong dan tabung (*shell & tube*). Modul yang dibuat ada tiga buah dengan variasi serat 10, 15, dan 20 serat. Tiap modul memiliki dimensi yang sama, yaitu panjang 40 cm; diameter dalam 1,9 cm; dan diameter luar 2,2 cm. Setelah merancang modul lalu menyiapkan peralatan-peralatan seperti reservoir pelarut, pompa, tabung gas CO₂, *massflow meter* dan menghubungkannya sehingga menjadi satu sistem secara keseluruhan.

Tahap selanjutnya adalah preparasi atau persiapan pelarut. Pelarut yang digunakan adalah dari buah mengkudu dengan dosis 100 gram buah mengkudu per liter

air. Berikut ini adalah langkah-langkah dalam tahapan preparasi pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*):

1. Memilih buah mengkudu yang masih segar dan membersihkannya.
2. Menimbang buah mengkudu.
3. Memotong buah mengkudu kecil-kecil.
4. Memasukkan potongan-potongan buah mengkudu ke dalam air dengan dosis 100 gram buah mengkudu per liter air dan dipanaskan sampai air berubah warna menjadi agak kehijauan.
5. Menyaring pelarut yang telah dipanaskan untuk menghilangkan pengotor-pengotornya.
6. Menampung pelarut di dalam reservoir pelarut.
7. Melakukan uji GC/MS untuk mengetahui komposisi kimia larutan sebelum dan setelah mengabsorb CO_2 .

Setelah preparasi pelarut selesai dan pelarut dimasukkan ke dalam reservoir, tahap selanjutnya adalah mengalirkan gas CO_2 dengan laju alir gas sebesar 180 sccm dan menunggu hingga keadaannya *steady*. Kemudian pelarut dialirkan dengan memanfaatkan pompa dan *flow meter*. Setelah kondisi *steady* pengambilan sampel dilakukan untuk setiap variasi laju alir 350; 400; 450; 500; 550; dan 600 liter/jam. Data yang diambil adalah waktu yang dibutuhkan gas CO_2 per 15 mL pada *bubbleflow meter* yang menunjukkan laju alir gas CO_2 yang tidak terserap ke dalam pelarut, pH awal sampel sebelum melewati modul membran dan pH sampel akhir tiap laju alir sesudah melewati modul serta perubahan tekanan pelarut sebelum dan sesudah melewati modul untuk studi hidrodinamika. Selanjutnya mengolah data dan menganalisis untuk mendapatkan nilai koefisien perpindahan massa dan korelasinya seperti bilangan Reynolds dan bilangan Sherwood dan aspek hidrodinamika seperti faktor friksi.



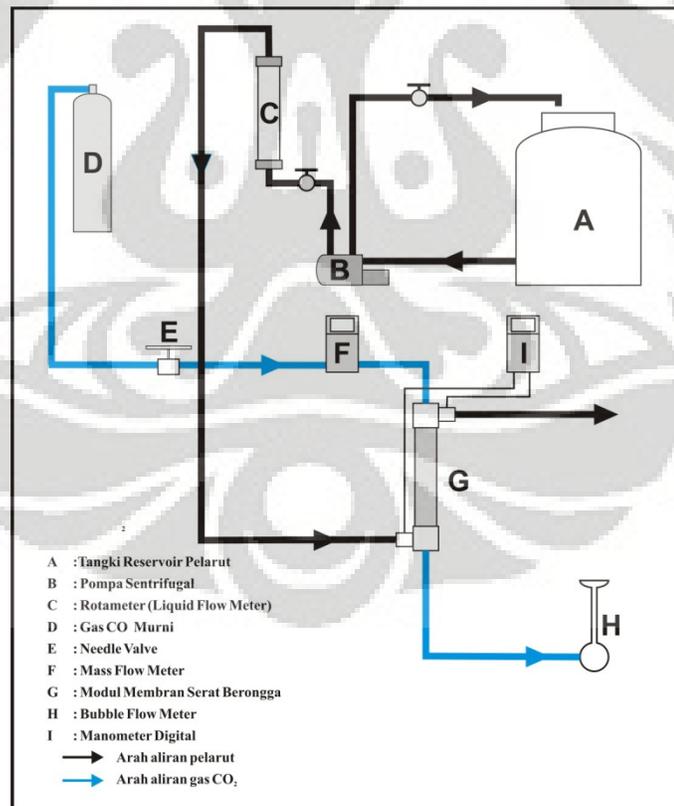
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.3 Skema Alat

Skema rancangan alat untuk penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2. Umpan fasa gas mengalir dari tabung gas CO₂ dengan diatur menggunakan *needle valve*. Pengaturan gas CO₂ dimaksudkan agar tekanan CO₂ yang masuk tidak terlalu besar dibandingkan tekanan pada keluaran membran yang bertujuan untuk menghindari terjadinya perpindahan CO₂ akibat perbedaan tekanan. Laju alir gas yang digunakan adalah 180 sccm. Kemudian umpan fasa gas memasuki modul dan

dibiarkan hingga *steady*. Kemudian mengalirkan pelarut dari reservoir dengan menggunakan pompa dan *flow meter* untuk mengatur laju alirnya. 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 waktu keluaran dari laju alir CO₂ pada *bubbleflow meter*, pH sampel awal dan pH sampel akhir. Pengambilan data dilakukan untuk setiap variasi laju alir dan jumlah serat. Untuk studi hidrodinamika data yang diambil adalah perbedaan tekanan sebelum dan setelah melewati modul. Pengambilan data juga dilakukan untuk setiap variasi laju alir dan jumlah serat.

Untuk analisis pelarut, sampel yang akan dianalisis adalah kondisi sampel sebelum mengabsorb CO₂ dan kondisi sampel setelah mengabsorb CO₂ dengan menggunakan GC/MS. Hal ini untuk mengetahui senyawa apakah di dalam sampel yang komposisinya berubah sebelum dan sesudah mengabsorb CO₂ yang mengindikasikan bahwa senyawa tersebut bereaksi dengan CO₂.



Gambar 3.2 Skema alat penelitian

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Kontaktor membran serat berongga
 - Material : Polipropilen
 - Ukuran pori : 0,2 μm
 - Ukuran modul :
 - Diameter serat : 0,27 cm
 - Panjang membran : 40 cm
 - Jumlah serat : 10, 15, dan 20 serat
2. Tangki reservoir sebagai tempat untuk pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*).
3. Tabung gas CO₂.
4. *Needle valve*, untuk mengontrol laju alir gas CO₂.
5. Pompa, digunakan untuk mengalirkan air dari reservoir menuju modul membran dengan spesifikasi sebagai berikut:
 - Produksi : Pedrollo
 - Jenis : Pompa sentrifugal
 - Spesifikasi :
 - Q_{min} : 5-40 L/min
 - Q_{max} : 45 L/min
 - H_{max} : 40-42 m
 - V : 220 V
 - RPM : 2900 RPM
 - kW : 0,1 kW
6. *Flowmeter / rotameter* untuk mengatur laju alir dari pelarut.
 - Produksi : Cole Parmer
 - Q : 100-1000 L/h
7. *Mass flow meter*, untuk mengukur besarnya laju alir gas CO₂.
8. pH meter, untuk mengukur pH sampel.
 - Model : Portable meter, Orion

Tipe : 3-Star pH meter

9. *Bubbleflow meter* untuk mengetahui laju alir gas CO₂ keluaran modul membran yang tidak terabsorp oleh pelarut.
10. Manometer digital, untuk mengukur perbedaan tekanan pelarut sebelum dan sesudah melewati modul.

Tipe : Lutron PM-9100 HA

11. GC/MS, untuk mengetahui kandungan dan konsentrasi komponen-komponen di dalam larutan buah mengkudu yang berpotensi sebagai absorben CO₂.

Sedangkan bahan-bahan yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah:

1. *Acrylic*, sebagai selongsong kontaktor membran.
 2. Pipa PVC, sebagai penghubung antara tangki air dengan kontaktor membran sehingga air mengalir melalui pipa ini.
 3. Lem epoksi, sebagai perekat pada pembuatan kontaktor membran.
 4. Gas CO₂, sebagai umpan yang akan diabsorpsi.
- Produksi : Industrial Gases Indonesia
5. Air, sebagai fasa cair untuk proses absorpsi dengan pH yang mendekati 7.
 6. Larutan dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*), sebagai absorben CO₂.

3.5 Prosedur Percobaan

Prosedur-prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:

1. Pembuatan modul.
Modul disusun berbentuk selongsong dan tabung (*shell & tube*) dengan selongsong terbuat dari *acrylic* dan tabung terbuat dari serat berbahan dasar polipropilen yang direkatkan dengan lem epoksi.
2. Menghubungkan peralatan berupa tabung gas CO₂, reservoir, pompa, *flowmeter / rotameter, massflow meter*, modul membran, dan *bubbleflow meter* sehingga menjadi satu sistem secara keseluruhan.
3. Menyiapkan pelarut yang dari buah mengkudu.

Tahapan dalam preparasi pelarut adalah mencuci buah mengkudu, menimbang buah mengkudu, memotong kecil-kecil buah mengkudu, memasukkan ke dalam air dengan dosis 100 gram buah mengkudu per liter air, dan memanaskannya sampai air berubah warna.

4. Mengalirkan gas CO₂ tanpa variasi tekanan dan menunggu hingga keadaan *steady*.
5. Mengalirkan pelarut dengan variasi laju alir dan menunggu hingga keadaan *steady*.
6. Melakukan pengambilan data:
 - a) Untuk studi perpindahan massa
Data yang diambil adalah laju alir gas CO₂ keluaran dari modul membran yang ditunjukkan waktu yang dibutuhkan untuk sebuah gelembung udara untuk mencapai volume 15 mL pada *bubbleflow meter* dan pH keadaan awal dan pH keadaan akhir sampel.
 - b) Untuk studi hidrodinamika
Menghitung penurunan tekanan masukan dan keluaran modul membran dengan menggunakan manometer digital pada setiap laju sirkulasi.
7. Melakukan pengambilan sampel untuk setiap variasi laju alir dan jumlah serat.

3.6 Kondisi Operasi

Sistem berada pada kondisi *continuous* dengan ketentuan sebagai berikut:

1. Memvariasikan laju alir pelarut dari 350-600 liter/jam dengan interval 50 liter/jam.
2. Pengambilan sampel dilakukan setelah sistem berada dalam kondisi *steady*.
3. Jumlah serat yang dipakai 10, 15, dan 20 serat.
4. Pengambilan data berupa laju alir gas CO₂ keluaran modul, pH sampel awal, pH sampel akhir, dan perbedaan tekanan sebelum dan setelah melewati modul.

3.7 Pengolahan Data

3.7.1 Tabel Data Pengamatan

A. Uji Perpindahan Massa

Jenis pelarut =

Jumlah Serat =

Laju alir gas CO₂ input =

pH kondisi awal =

Tabel 3.1 Tabel pengamatan uji perpindahan massa

Laju alir (L/hr)	Data 1		Data 2	
	pH	t <i>bubbleflow meter</i> (detik)	pH	t <i>bubbleflow meter</i> (detik)
350				
400				
450				
500				
550				
600				

B. Uji Hidrodinamika

Jumlah Serat =

Tabel 3.2 Tabel pengamatan uji hidrodinamika

Laju alir (L/hr)	Data 1		Data 2		Data 3	
	ΔP (Pa)	T (°C)	ΔP (Pa)	T (°C)	ΔP (Pa)	T (°C)
350						
400						
450						
500						
550						
600						

3.7.2 Koefisien Perpindahan Massa

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

$$k_l = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{A_m} \quad (2.2)$$

dimana:

- k_l = koefisien perpindahan massa
- Q_{in} = laju alir gas CO₂ input (sccm)
- Q_{out} = laju alir gas CO₂ keluaran modul membran (sccm)
- A_m = luas kontak modul membran (m²)

Untuk mencari luas kontak perpindahan massa dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$A_m = n_f \cdot \pi \cdot d_f \cdot l \quad (3.1)$$

dimana:

- A_m = luas kontak perpindahan massa (m²)
- n_f = jumlah fiber/serat di dalam modul
- d_f = diameter luar fiber/serat (m)
- l = panjang modul membran (m)

Nilai yang tertera pada *massflow meter* merupakan nilai laju alir gas CO₂ input pada kondisi standard. Untuk mencari nilai koefisien perpindahan massa maka nilai tersebut perlu dikonversikan terlebih dahulu ke kondisi aktual. Kondisi standard pada *massflow meter* adalah pada tekanan 1 atm dan temperatur 21⁰C sedangkan kondisi aktual saat penelitian adalah pada tekanan 1 atm dan temperatur 25⁰C. Untuk mengetahui nilai laju alir gas CO₂ pada kondisi aktual dapat digunakan persamaan:

$$Q_2 = \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \cdot Q_1 \quad (3.2)$$

dimana:

- Q_2 = laju alir gas CO₂ pada kondisi aktual (accm)
- Q_1 = laju alir gas CO₂ pada kondisi standard (sccm)
- P_1 = tekanan gas CO₂ input pada kondisi standard (atm)

- P_2 = tekanan gas CO₂ input pada kondisi aktual (atm)
 T_1 = temperatur gas CO₂ input pada kondisi standard (°C)
 T_2 = temperatur gas CO₂ input pada kondisi aktual (°C)

3.7.3 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 bilangan tak berdimensi tersebut:

$$Sh = k \frac{d_e}{D} \quad (2.4)$$

dimana:

- Sh = bilangan Sherwood
 k = koefisien perpindahan massa (m/s)
 d_e = diameter ekuivalen (m)
 D = difusivitas pelarut (m²/s)

$$Re = \frac{\rho \cdot v_l \cdot d_e}{\mu} \quad (2.5)$$

dimana:

- Re = bilangan Reynolds
 ρ = massa jenis dari pelarut (kg/m³)
 v_l = viskositas kinematik (m/s)
 d_e = diameter ekuivalen (m)
 μ = viskositas dari pelarut (kg/ms)

$$Sc = \frac{v_l}{D} \quad (2.6)$$

dimana:

- Sc = bilangan Schmidt
 v_l = viskositas kinematik (m/s)
 D = difusivitas pelarut (m²/s)

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

$$Sh = a Re^b Sc^c \quad (2.3)$$

Persamaan (2.2) merupakan persamaan untuk menunjukkan hubungan koefisien perpindahan massa terhadap jenis aliran pada modul baik berupa laminar, transisi, maupun turbulen.

3.7.4 Studi Hidrodinamika

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

$$f = \frac{\varepsilon(D_o^2 - D_i^2)\Delta P}{4d_o L_f \left(\frac{1}{2}\right)\rho v^2} = \frac{d_e \Delta P}{2L_f \rho v^2} \quad (2.9)$$

dimana:

- f = friksi
- d_e = diameter ekuivalen (m)
- ΔP = penurunan tekanan (Pa)
- L_f = panjang modul membran (m)
- ρ = massa jenis pelarut (kg/m^3)
- v = kecepatan linier pelarut (m/s)

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 literatur diperoleh pada laju alir yang digunakan pada penelitian.

3. Friksi ratio

Friksi ratio diperoleh dari perbandingan antara nilai friksi modul hasil percobaan dengan nilai friksi literatur.

$$f_{ratio} = \frac{f_{modul}}{f_{literatur}} \quad (3.3)$$

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui efektifitas proses absorpsi CO₂ oleh pelarut dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) dan air di dalam kontaktor membran serat berongga dapat ditinjau dari nilai perpindahan massa dan aspek hidrodinamika. Studi perpindahan massa dapat ditinjau dari profil nilai koefisien perpindahan massa dengan melihat pengaruh dari variasi laju alir dan variasi jumlah serat pada pelarut dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) dan air. Sedangkan studi hidrodinamika digunakan untuk melihat pengaruh jenis aliran terhadap efektifitas kinerja dari membran dengan cara melihat pengaruh faktor friksi yang ditimbulkan oleh aliran fluida terhadap kemampuan pelarut untuk mengabsorb CO₂. Faktor friksi ini berhubungan langsung dengan bilangan Reynolds yang menunjukkan jenis aliran yang terjadi apakah laminar, transisi atau turbulen.

4.1 Studi Perpindahan Massa

Koefisien perpindahan massa merupakan besaran yang dapat memperlihatkan studi perpindahan massa pada proses absorpsi CO₂. Besarnya koefisien perpindahan massa juga dapat dijadikan sebagai tolak ukur dari efektifitas proses absorpsi CO₂ oleh pelarut dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) dan air. Nilai koefisien perpindahan massa diperoleh dari pengolahan data berupa perubahan nilai laju alir gas CO₂ sebelum masuk ke dalam modul membran dan nilai laju alir gas CO₂ setelah melewati modul membran. Selain koefisien perpindahan massa, parameter lain yang digunakan adalah pH sampel awal sebelum mengabsorb CO₂ dan pH sampel setelah mengabsorb CO₂.

Korelasi perpindahan massa digunakan untuk mengetahui hubungan antara kecepatan dan jenis aliran yang melewati modul terhadap koefisien perpindahan massa yang dipengaruhi geometri membran. Korelasi ini ditunjukkan oleh bilangan tidak berdimensi, yaitu bilangan 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 CO₂.

4.1.1 Pengaruh Jenis Pelarut

Proses absorpsi CO₂ di dalam kontaktor membran serat berongga dengan menggunakan dua jenis pelarut yang berbeda bertujuan untuk mengetahui efektifitas proses perpindahan massa yang terjadi dengan menggunakan air yang merupakan pelarut universal dan membandingkannya dengan pelarut dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) yang memiliki kandungan senyawa-senyawa yang khas.

Untuk mengetahui jenis absorpsi yang terjadi, apakah absorpsi fisik atau absorpsi kimia, dapat digunakan persamaan yang dikemukakan oleh Qi dan Cussler (1985). Persamaan ini dapat digunakan untuk membuktikan adanya faktor reaksi pada absorpsi CO₂ oleh pelarut.

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

Untuk pelarut air, nilai faktor ini yang didapat pada setiap laju alir dan jumlah serat berada pada rentang $2,32 \times 10^{-2}$ hingga $4,4 \times 10^{-2}$. Hal ini berarti absorpsi yang terjadi pada pelarut air merupakan absorpsi secara fisika. Untuk pelarut dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) nilai faktor yang didapat berada pada rentang $2,47 \times 10^{-2}$ hingga $4,89 \times 10^{-2}$ sehingga jenis absorpsi dengan menggunakan pelarut dari buah mengkudu juga merupakan jenis absorpsi yang terjadi secara fisika.

Absorpsi secara fisika yaitu melarutkan CO₂ secara fisik tanpa disertai reaksi kimia ke dalam pelarutnya yang dipengaruhi oleh difusivitas CO₂ ke dalam air. Proses perpindahan massa yang terjadi dipengaruhi oleh laju difusi fasa gas terhadap fasa cair. Pada dasarnya proses absorpsi CO₂ oleh air juga terjadi secara kimia. Reaksi kimia yang terjadi antara air dan CO₂ dapat digambarkan sebagai berikut:

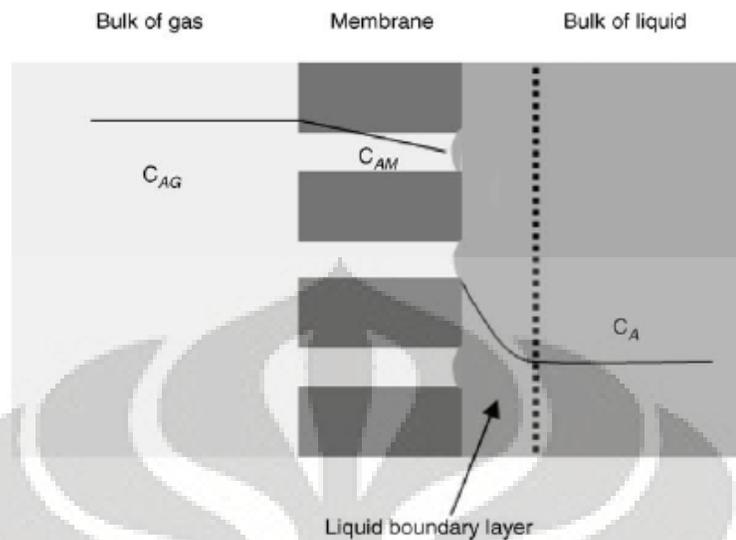


Reaksi antara air dan CO₂ akan menghasilkan H₂CO₃. Akan tetapi reaksi CO₂ dengan air (H₂O) merupakan reaksi kesetimbangan, dimana konstanta kesetimbangan

bernilai sangat kecil sehingga pembentukan ion H^+ dan ion HCO_3^- juga bernilai sangat kecil. Oleh karena itu, absorpsi CO_2 oleh air lebih dinyatakan sebagai absorpsi fisika dengan mengabaikan reaksi kimia yang ada.

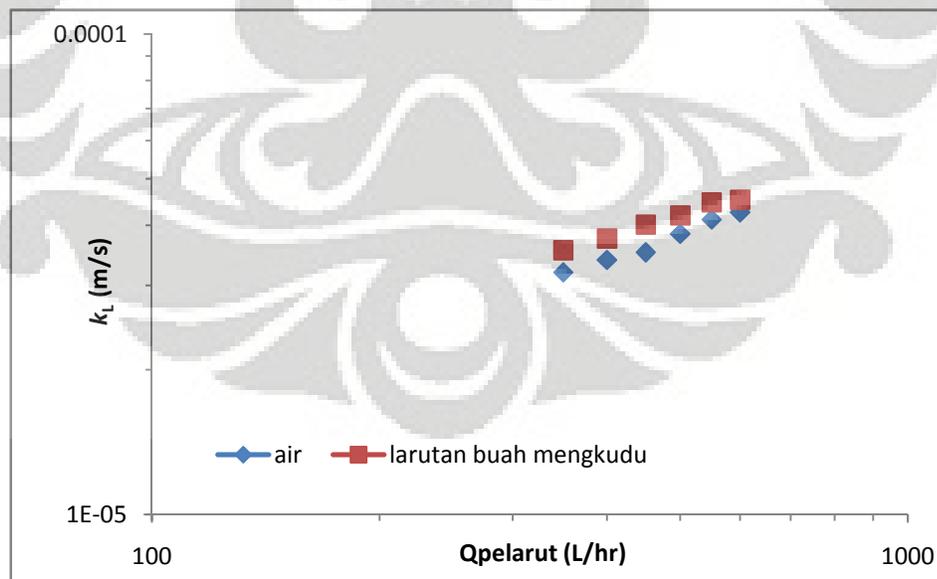
Pada penggunaan pelarut dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*), jenis absorpsi yang terjadi juga merupakan absorpsi fisika. Sama halnya seperti pelarut air, gaya penggerak dari absorpsi fisika pada pelarut dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) merupakan perbedaan konsentrasi gas pada aliran pelarut. Hanya saja pada buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) terdapat senyawa-senyawa yang dapat membuat buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) mampu mengabsorb CO_2 lebih banyak daripada pelarut air biasa. Dosis yang digunakan untuk membuat pelarut dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) adalah 100 gr buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) per liter air. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari senyawa-senyawa di dalam buah mengkudu terhadap proses absorpsi CO_2 .

Proses perpindahan massa yang terjadi di dalam modul dapat diilustrasikan dengan profil konsentrasi CO_2 pada membran. Profil konsentrasi ini dapat dilihat pada Gambar 4.1. Gambar ini menunjukkan bahwa konsentrasi CO_2 pada bulk gas menuju membran awalnya tinggi, namun karena terdapat tahanan membran maka konsentrasi CO_2 akan menurun. Menurunnya konsentrasi CO_2 ini disebabkan CO_2 harus melewati pori-pori membran. Selanjutnya setelah memasuki bulk fasa cair konsentrasi CO_2 akan kembali menurun yang disebabkan adanya lapisan film fasa cair.

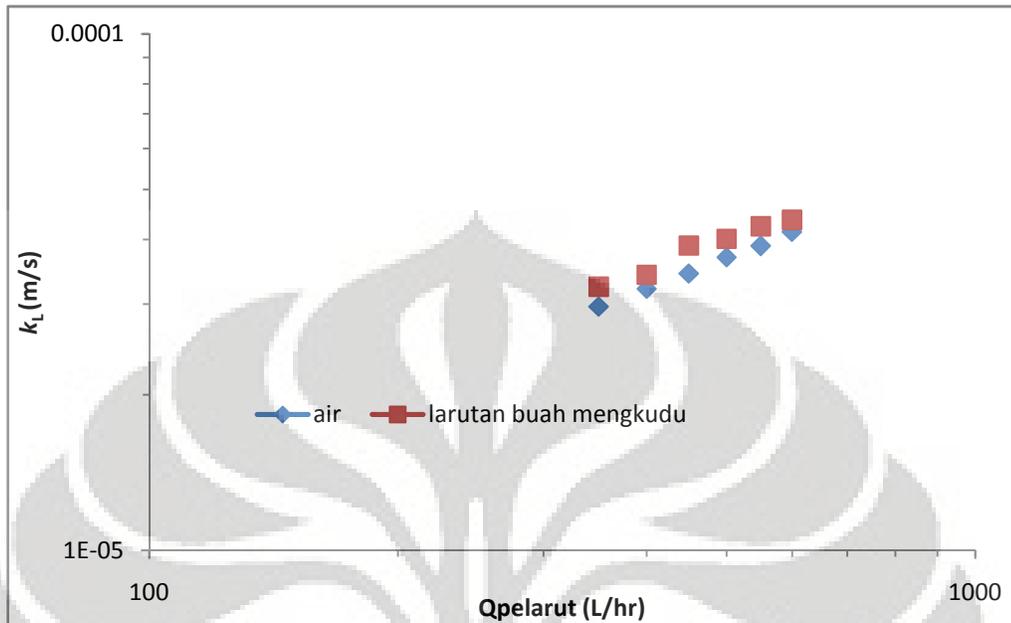


Gambar 4. 1 Profil konsentrasi CO₂ dalam kontaktor membran hidrofobik untuk absorpsi CO₂ (Zhang et. Al, 2006)

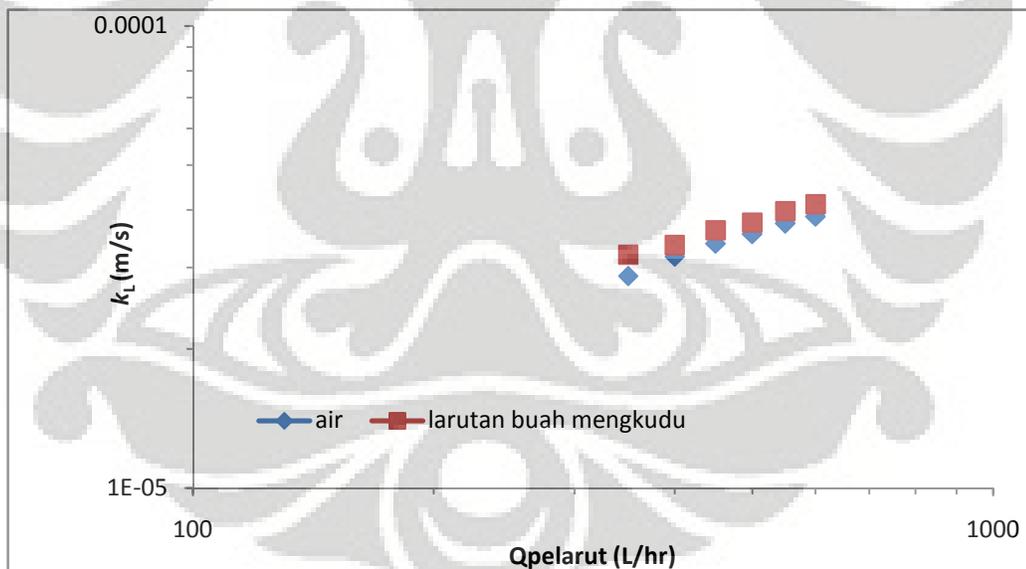
Jenis pelarut yang digunakan sangat menentukan perubahan efektifitas peristiwa absorpsi CO₂ yang terjadi dan juga mempengaruhi nilai koefisien perpindahan massa yang didapat. Berikut merupakan grafik pengaruh jenis pelarut yang digunakan terhadap nilai koefisien perpindahan massa pada berbagai laju alir dan jumlah serat.



Gambar 4. 2 Pengaruh jenis pelarut pada absorpsi CO₂ dengan modul 10 serat dan berbagai variasi laju alir pelarut



Gambar 4.3 Pengaruh jenis pelarut pada absorpsi CO₂ dengan modul 15 serat dan berbagai variasi laju alir pelarut



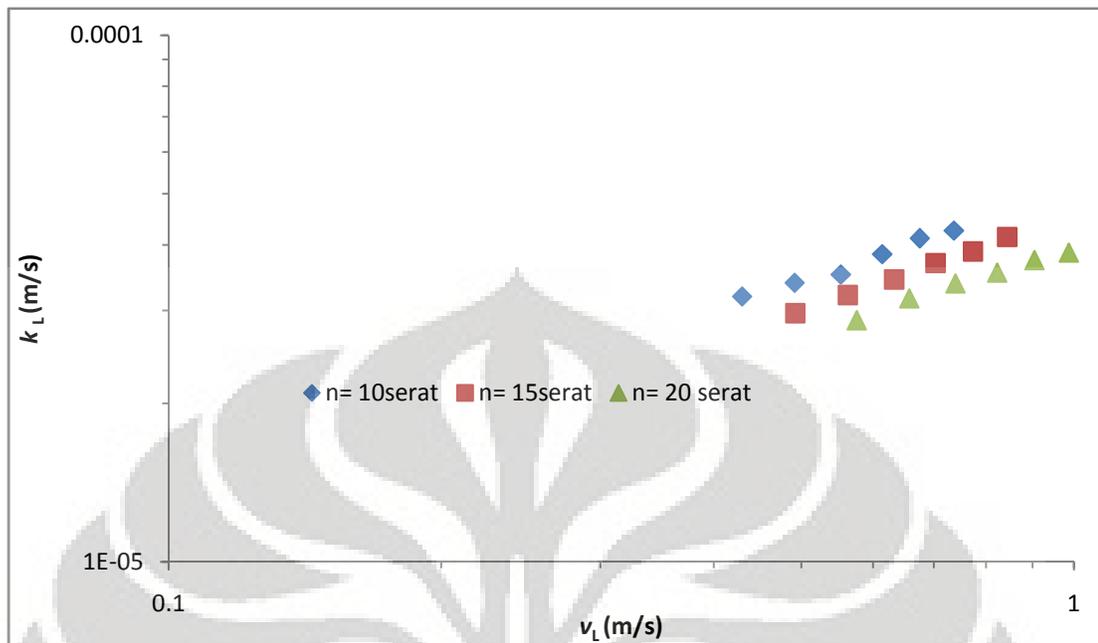
Gambar 4.4 Pengaruh jenis pelarut pada absorpsi CO₂ dengan modul 20 serat dan berbagai variasi laju alir pelarut

Dari ketiga gambar di atas, yaitu Gambar 4.2, Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa nilai koefisien perpindahan massa pada pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) lebih tinggi dibandingkan pelarut air pada setiap laju alir yang

berbeda dan variasi serat. Hal ini mengindikasikan bahwa gas CO₂ terserap lebih banyak pada pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*). Kemampuan buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) untuk menyerap CO₂ lebih banyak disebabkan kandungan kimia senyawa-senyawa di dalam buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) itu sendiri. Walaupun kandungan senyawa-senyawa kimia di dalam buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) mempengaruhi proses perpindahan massa yang terjadi tetapi efeknya tidak terlalu besar. Misalnya pada Gambar 4.4 dapat dilihat pada modul dengan 20 serat dan laju alir 600 L/hr nilai koefisien perpindahan massa pelarut air sebesar $3,87 \times 10^{-5}$ sedangkan pada pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) sebesar $4,11 \times 10^{-5}$ pada laju alir dan serat yang sama. Walaupun kandungan senyawa-senyawa di dalam buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) mempengaruhi nilai koefisien perpindahan massa pada pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) tetapi pengaruhnya tidak signifikan. Efektifitas proses perpindahan massa pada pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) hanya sebesar 6,47% dibandingkan pelarut air.

4.1.2 Pengaruh Laju Alir Pelarut

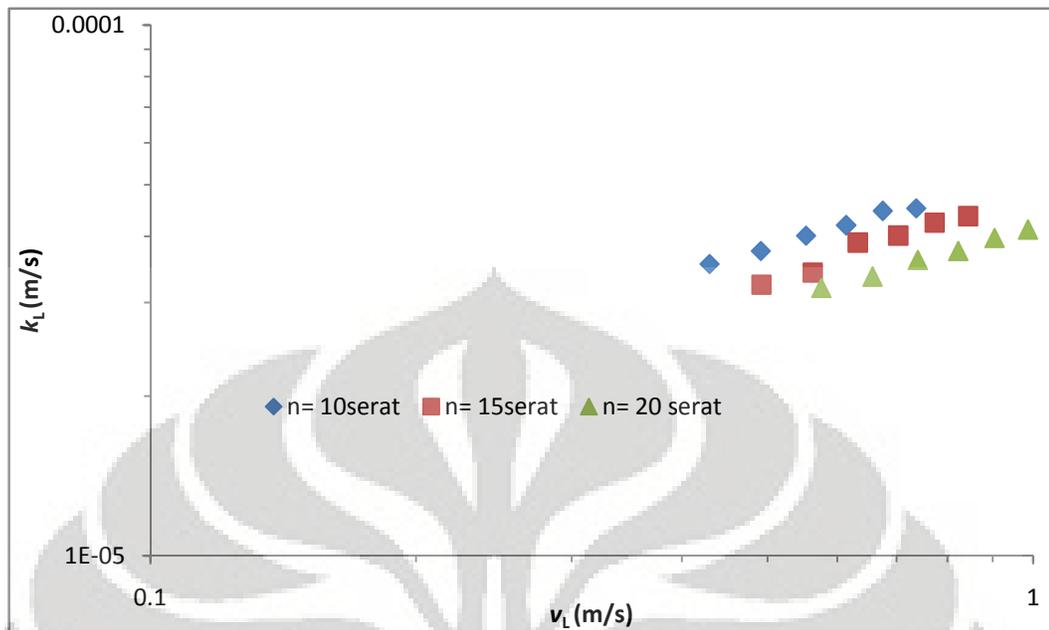
Variasi laju alir pelarut juga sangat menentukan perubahan efektifitas proses perpindahan massa yang terjadi. Hal ini berkaitan dengan dinamika fluida di dalam modul dan juga kuantitas pelarut itu sendiri terhadap proses perpindahan massa. Pengaruh laju alir pelarut dapat dilihat melalui kecepatan linier. Berikut ini grafik perbedaan nilai koefisien perpindahan massa terhadap kecepatan linier pada air.



Gambar 4.5 Pengaruh laju alir pelarut air terhadap koefisien perpindahan massa pada setiap modul

Dari Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya kecepatan linier yang diakibatkan peningkatan laju alir akan meningkatkan koefisien perpindahan massa yang didapat. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi laju alir akan dapat mempercepat proses absorpsi fisika yang terjadi. Hal ini disebabkan gas CO_2 dapat berdifusi dengan cepat melalui pori membran. Peningkatan koefisien perpindahan massa dipengaruhi langsung oleh fraksi kekosongan dan distribusi pelarut di dalam modul. Dengan semakin meningkatnya kecepatan aliran pelarut maka fraksi kekosongan di dalam modul akan terpenuhi oleh pelarut sehingga pada kondisi ini distribusi pelarut menjadi semakin merata dan kemampuan absorpsi menjadi meningkat dan perpindahan massa akan semakin tinggi.

Sama halnya seperti pelarut air, absorpsi fisika yang terjadi pada pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) juga dipengaruhi oleh laju alir pelarut. Pengaruh laju alir pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) dapat dilihat melalui kecepatan linier. Berikut ini grafik perbedaan nilai koefisien perpindahan massa terhadap kecepatan linier pada pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*).



Gambar 4.6 Pengaruh laju alir pelarut buah mengkudu terhadap koefisien perpindahan massa pada setiap modul

Dari Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan linier pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) maka nilai koefisien perpindahan massa yang didapat juga semakin tinggi. Hal ini sesuai dengan teori sebelumnya bahwa pada aliran tinggi maka jenis aliran akan semakin bersifat turbulen sehingga terjadi pencampuran pelarut dan CO_2 akan semakin cepat.

4.1.3 Pengaruh Jumlah Serat

Penggunaan modul yang berbeda merupakan implementasi dari variasi jumlah serat pada setiap modul. Jumlah serat yang divariasikan yaitu 10, 15 dan 20 serat. Pengaruh variasi jumlah serat terhadap proses perpindahan massa dapat dilihat dari nilai koefisien perpindahan massa yang didapat. Gambar 4.5 menunjukkan nilai koefisien perpindahan massa pada variasi jumlah serat yang berbeda pada pelarut air.

Dari Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya jumlah serat maka nilai koefisien perpindahan massa yang didapat akan semakin menurun. Hal ini disebabkan adanya fraksi kekosongan di dalam modul. Semakin banyak jumlah serat maka fraksi kekosongan di dalam modul akan semakin rendah disebabkan luas permukaan membran menjadi semakin besar. Dengan menurunnya fraksi

kekosongan, maka zona mati (*dead zone*) akibat adanya proses *chanelling* akan menjadi lebih banyak. Zona mati ini akan mengakibatkan area kontak antara fasa gas dengan fasa cair menjadi semakin berkurang sehingga perpindahan massa yang terjadi juga akan semakin sulit. Jadi koefisien perpindahan massa yang diperoleh akan semakin kecil seiring dengan semakin banyaknya jumlah serat di dalam modul. Hal ini sesuai dengan pernyataan yang diutarakan oleh Lipnizki dan Field (2001).

Semakin bertambahnya jumlah serat juga secara langsung dapat meningkatkan pembentukan lapisan film pada membran. Lapisan film ini terbentuk pada lapisan antarmuka gas-cair membran yang dapat menghambat proses absorpsi. Akibatnya proses perpindahan massa CO_2 yang melewati lapisan film akan terhambat dan menyebabkan menurunnya nilai koefisien perpindahan massa. Selain itu, peningkatan jumlah serat juga akan meningkatkan luas permukaan area kontak fasa gas-cair pada membran.

Pengaruh jumlah serat pada perpindahan massa dengan menggunakan pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) sama halnya seperti pada pelarut air. Gambar 4.6 memperlihatkan pengaruh jumlah serat pada pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) terhadap koefisien perpindahan massa.

Dari Gambar 4.6 juga dapat dilihat bahwa pada pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*), dengan semakin meningkatnya jumlah serat pada laju alir pelarut yang sama maka nilai koefisien perpindahan massa yang diperoleh akan semakin rendah. Penurunan nilai koefisien perpindahan massa ini terutama juga disebabkan oleh adanya fraksi kekosongan.

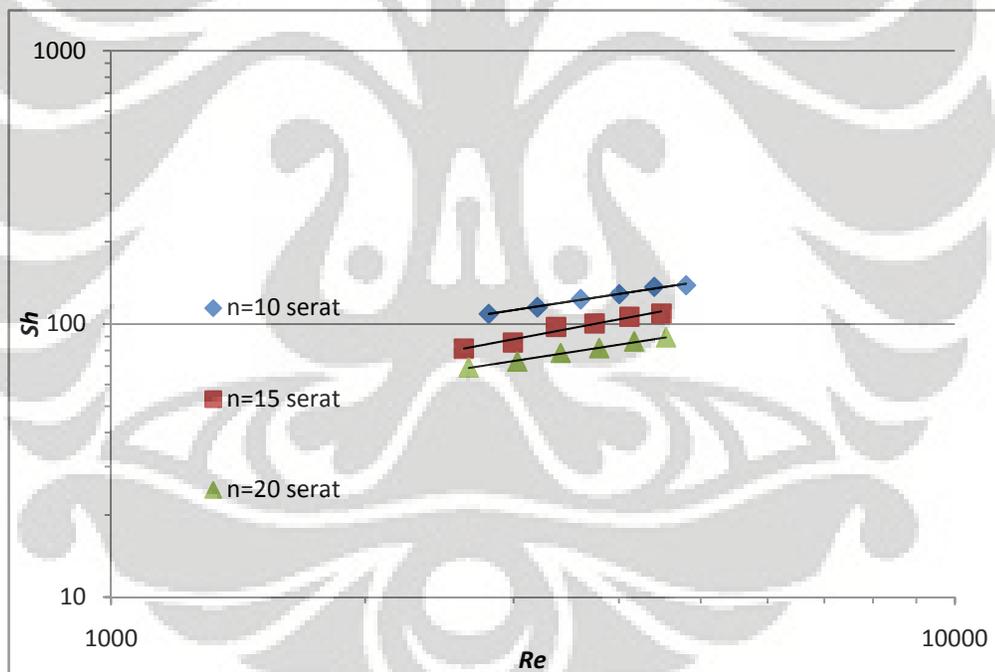
4.2 Korelasi Perpindahan Massa

Hubungan antara koefisien perpindahan massa dengan pengaruh jenis aliran dapat digambarkan dengan korelasi bilangan Reynolds dan bilangan Sherwood. Bilangan Sherwood merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan besarnya koefisien perpindahan massa terhadap difusivitas CO_2 terhadap air. Korelasi perpindahan massa dapat ditunjukkan dengan persamaan berikut.

$$Sh = a Re^b Sc^{1/3} \quad (4.3)$$

Nilai Reynolds diperoleh berdasarkan penurunan tekanan untuk setiap laju alir dan jumlah serat sedangkan pengaruh bilangan Scmidth pada pembelajaran ini tidak dievaluasi. Nilai pangkat dari bilangan Scmidth diasumsikan konstan sesuai dengan literatur untuk korelasi perpindahan massa yaitu 1/3.

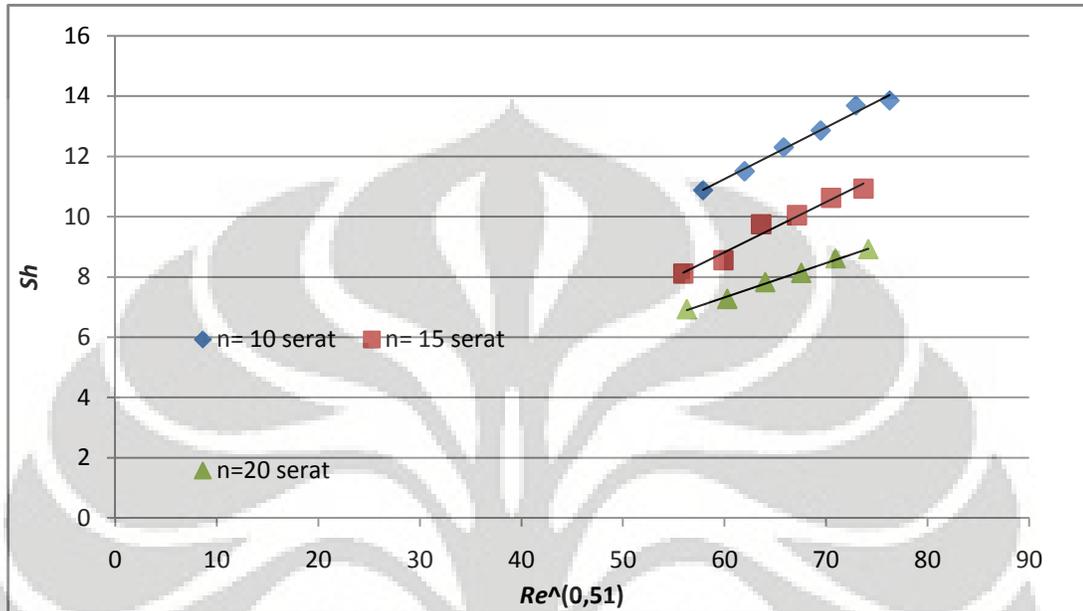
Untuk menentukan bilangan Sherwood digunakan persamaan (2.5) dimana data yang dibutuhkan adalah nilai koefisien perpindahan massa, nilai diameter ekuivalen dan difusivitas CO₂-H₂O yang bergantung temperatur. Selanjutnya bilangan Sherwood dan bilangan Reynolds dihubungkan melalui grafik menggunakan *trendline power* untuk setiap laju alir dan jumlah serat seperti dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7 Perbandingan bilangan Reynolds terhadap bilangan Sherwood pada variasi laju alir dan jumlah serat

Nilai pangkat atau orde yang diperoleh dari masing-masing persamaan garis yang diperoleh dari Gambar 4.7 kemudian dihitung nilai rata-ratanya untuk perhitungan selanjutnya. Nilai rata-rata b yang didapat yaitu 0,51. Selanjutnya nilai

ini akan dijadikan pangkat bagi bilangan Reynolds baru yang disebut dengan Re^b . Kemudian nilai Re^b ini akan dihubungkan kembali dengan bilangan Sherwood dalam grafik *trendline linear* seperti pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Perbandingan bilangan Reynolds^b terhadap bilangan Sherwood pada variasi laju alir dan jumlah serat

Selanjutnya koefisien yang didapat dari persamaan garis pada Gambar 4.8 akan dihubungkan dengan fraksi kepadatan membran. Bilangan Sherwood juga merupakan bilangan yang menunjukkan hubungan geometri modul dengan aliran di dalam modul. Hubungan tersebut dapat dilihat pada persamaan (4.4).

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

(4.4)

Jenis geometri membran ditunjukkan oleh besarnya fraksi kepadatan membran (φ). Fraksi kepadatan membran ini menunjukkan kerapatan pada membran.

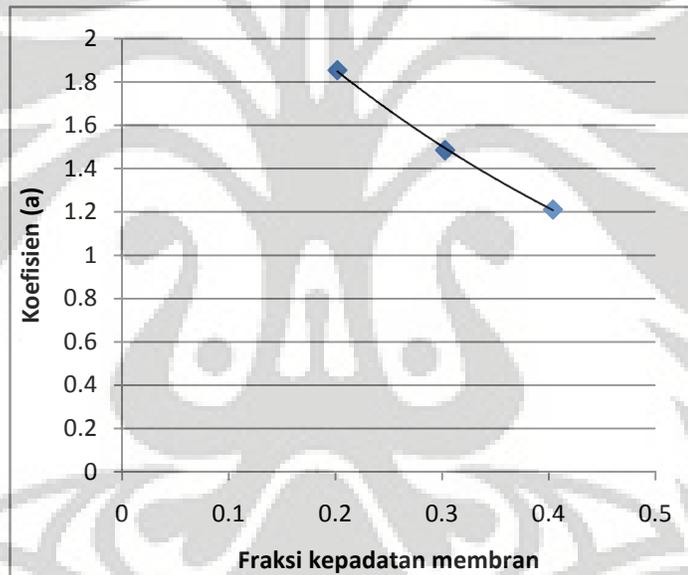
$$\varphi = n \left(\frac{d_f}{d_s} \right)^2 \quad (4.5)$$

Nilai koefisien (a) yang diperoleh dari persamaan garis pada Gambar 4.10 dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Koefisien dan fraksi kepadatan membran untuk setiap modul

Modul	Koefisien (a)	Fraksi kepadatan membran(φ)
10	1,86	0,20
15	1,49	0,30
20	1,21	0,40

Nilai koefisien ini selanjutnya dihubungkan dengan fraksi kepadatan membran dalam grafik dengan *trendline power* seperti pada Gambar 4.9 sehingga diperoleh persamaan yang selanjutnya digunakan untuk menghubungkan bilangan Reynolds dan bilangan Sherwood.



Gambar 4. 9 Fraksi kepadatan membran untuk setiap modul

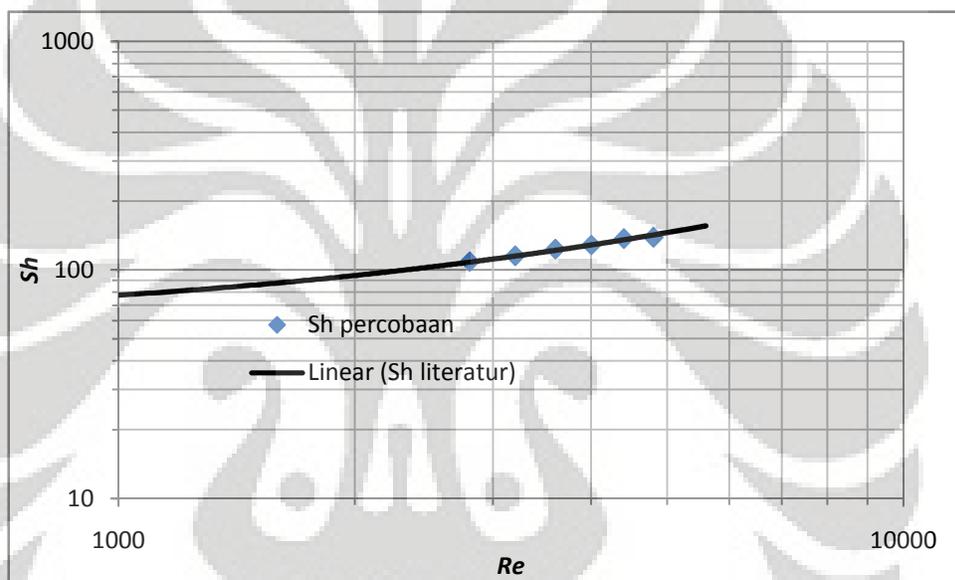
Persamaan pada Gambar 4.9 dan Tabel 4.1 selanjutnya akan digunakan untuk menunjukkan hubungan antara geometris pada setiap modul dengan jenis aliran di dalam modul tersebut.

$$f(\varphi) = 0,704x^{-0,61} \quad (4.6)$$

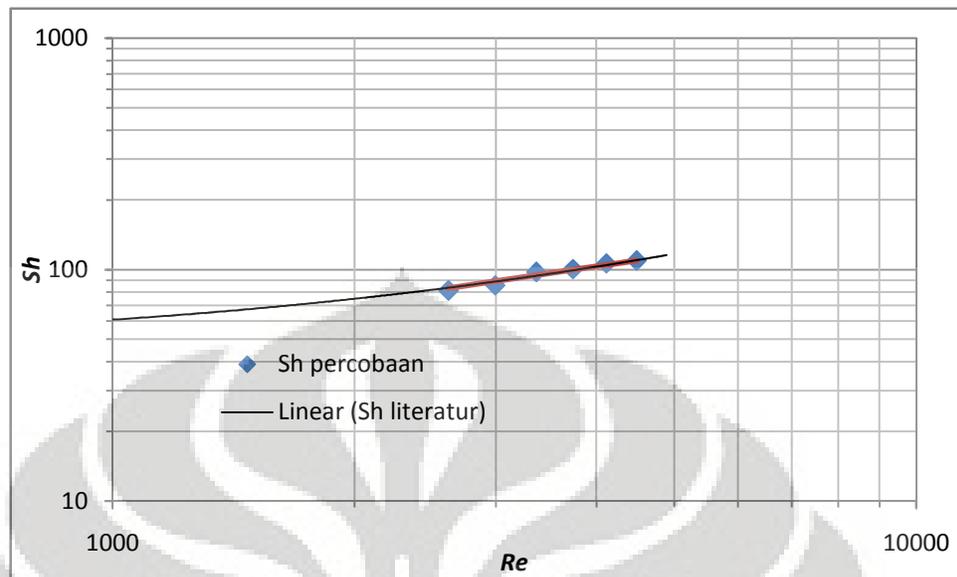
Lalu dengan mensubstitusikan persamaan (4.6) ke persamaan (4.4) maka diperoleh persamaan yang menghubungkan geometris membran terhadap aliran fluida di dalam modul.

$$Sh = 0,704(\varphi)^{-0,61} \cdot Re^{0,51} \quad (4.7)$$

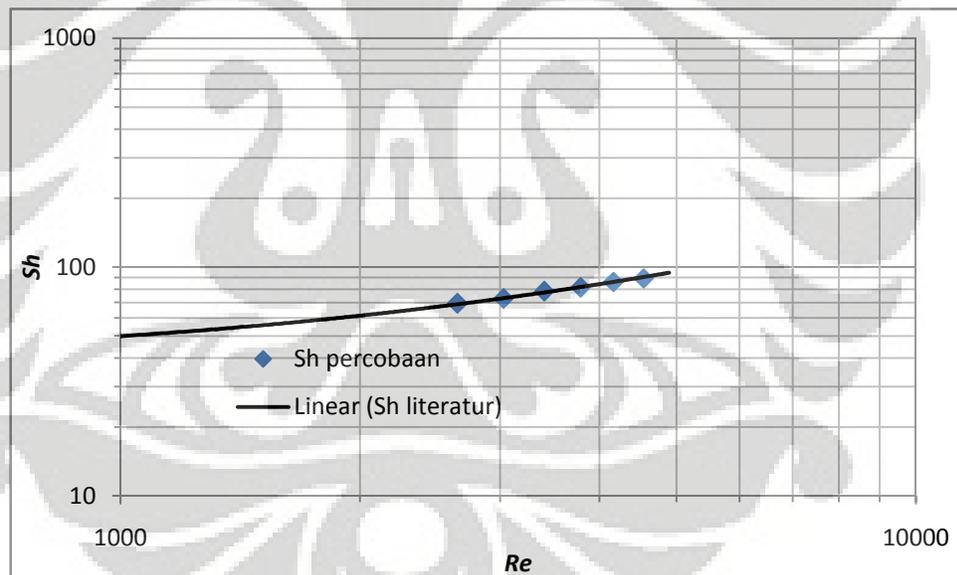
Dari persamaan ini selanjutnya diperoleh hubungan bilangan Reynolds dengan bilangan Sherwood sebagai berikut:



Gambar 4. 10 Hubungan bilangan Reynolds terhadap bilangan Sherwood pada modul dengan serat 10



Gambar 4.11 Hubungan bilangan Reynolds terhadap bilangan Sherwood pada modul dengan serat 15



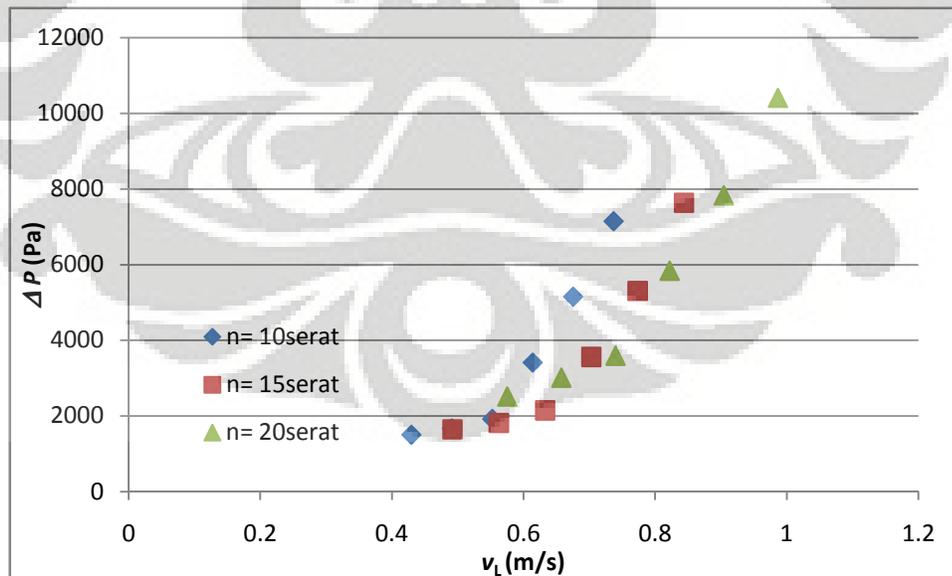
Gambar 4.12 Hubungan bilangan Reynolds terhadap bilangan Sherwood pada modul dengan serat 20

Dari Gambar 4.10, 4.11, dan 4.12 dapat dilihat bahwa antara bilangan Reynolds dengan bilangan Sherwood berbanding lurus. Semakin tinggi bilangan Reynolds maka bilangan Sherwood pun akan meningkat. Semakin tinggi bilangan Reynolds maka jenis aliran di dalam modul akan semakin ke arah turbulen dan

semakin tinggi bilangan Sherwood maka nilai koefisien perpindahan massa yang didapat pun semakin besar. Dengan demikian proses perpindahan massa lebih banyak terjadi pada kondisi aliran yang turbulen di dalam modul. Dari ketiga grafik di atas juga dapat dilihat bahwa perbandingan antara bilangan Reynolds dan bilangan Sherwood percobaan dengan bilangan Reynolds dan bilangan Sherwood literatur tidak menyimpang terlalu jauh. Hal ini berarti proses absorpsi yang berlangsung efektif. Dari persamaan (4.7) juga terlihat bahwa eksponen dari bilangan Reynolds (b) lebih besar dari 0,5 sehingga dapat disimpulkan bahwa perpindahan massa berupa difusi CO_2 ke dalam pelarut terjadi pada aliran turbulen (Costello, 1993).

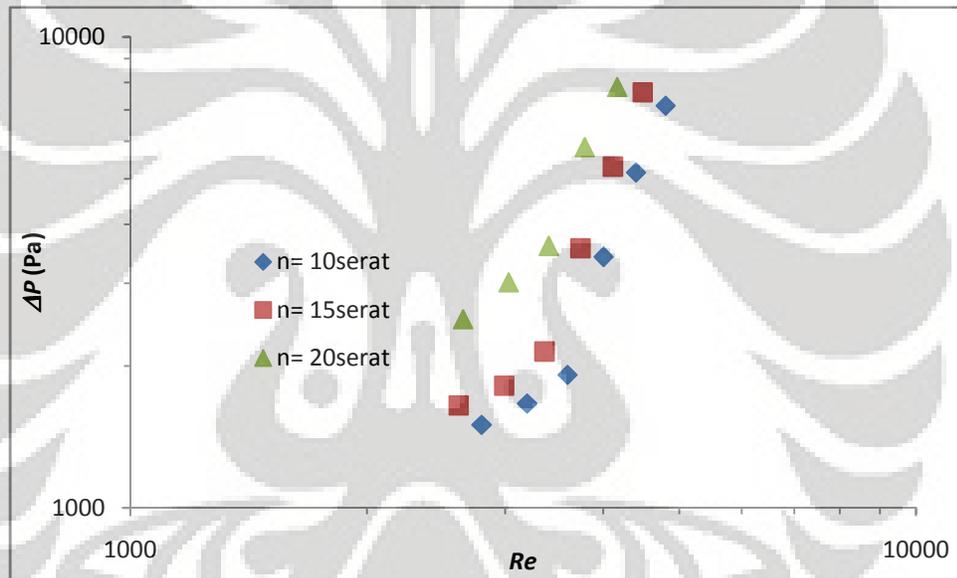
4.3 Studi Hidrodinamika

Proses absorpsi CO_2 oleh pelarut di dalam modul tidak lepas dari berbagai pengaruh dinamika fluida. Faktor-faktor yang berkaitan yaitu profil penurunan tekanan di dalam modul serta friksi atau gesekan yang ditimbulkan akibat gerak fluida terhadap dinding modul atau pun dinding serat. Pergerakan dari fluida itu sendiri tidak lepas dari profil aliran fluida tersebut yang ditunjukkan bilangan Reynolds.



Gambar 4.13 Profil penurunan tekanan terhadap variasi kecepatan aliran dan jumlah serat

Dari Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa kenaikan laju alir dapat meningkatkan penurunan tekanan yang terjadi di dalam modul. Semakin tinggi kecepatan aliran di dalam modul berarti jenis aliran tersebut makin ke arah turbulen dan kemungkinan terjadi friksi atau gesekan semakin besar sehingga mengakibatkan penurunan tekanan yang terjadi di dalam modul semakin besar. Dari gambar di atas juga dapat diketahui pengaruh dari variasi jumlah serat terhadap penurunan tekanan yang terjadi. Semakin banyak jumlah serat di dalam modul maka friksi atau gesekan yang terjadi di dalam modul pun akan semakin besar sebagai akibat dari semakin luasnya area kontak dinding terhadap fluida yang bergerak dan mengakibatkan penurunan tekanan yang terjadi semakin besar.



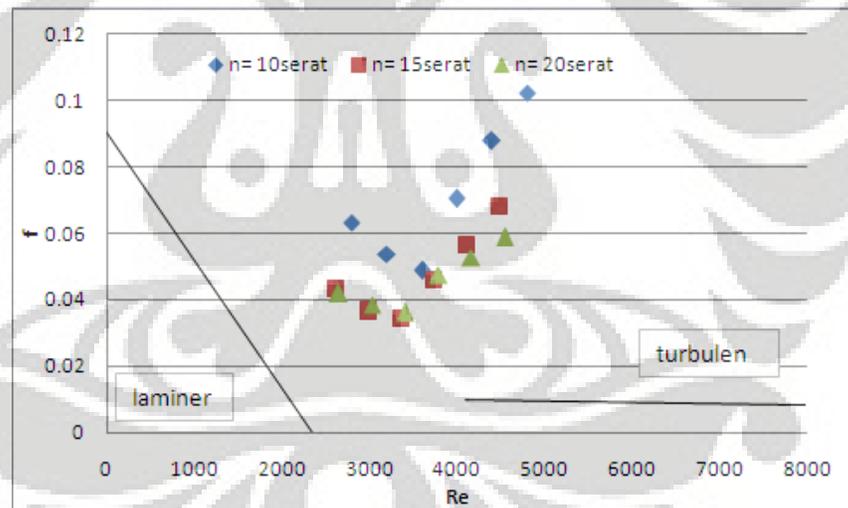
Gambar 4.14 Hubungan bilangan Reynolds dengan penurunan tekanan di dalam modul dengan variasi jumlah serat

Dari Gambar 4.14 dapat diketahui bahwa semakin tinggi bilangan Reynolds maka penurunan tekanan yang terjadi di dalam modul pun akan semakin besar. Hal ini seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa kenaikan laju alir akan menaikkan bilangan Reynolds dan membuat kondisi aliran menjadi semakin turbulen dan mengakibatkan kemungkinan terjadinya friksi atau gesekan di dalam modul semakin tinggi.

Semakin tinggi penurunan tekanan yang terjadi maka gaya gesek akan semakin tinggi pula yang disebabkan tingginya kecepatan aliran tetapi faktor friksi yang terjadi justru semakin rendah. Hal ini disebabkan faktor friksi berbanding terbalik dengan kecepatan aliran sesuai dengan persamaan:

$$f = \frac{d_e \Delta P}{2.L_f \cdot \rho \cdot v^2} \quad (2.11)$$

Dari persamaan di atas, jelaslah bahwa untuk fluida dengan kecepatan yang tinggi maka friksi atau gesekan yang ditimbulkan pun akan semakin tinggi yang disebabkan turbulensi fluida dimana friksi dapat dihasilkan dari gerak momentum antar fluida maupun dengan dinding modul. Tetapi faktor friksi yang dihasilkan semakin rendah yang disebabkan faktor friksi merupakan besaran yang berbanding terbalik dengan gaya kinetik suatu fluida yang bergerak.



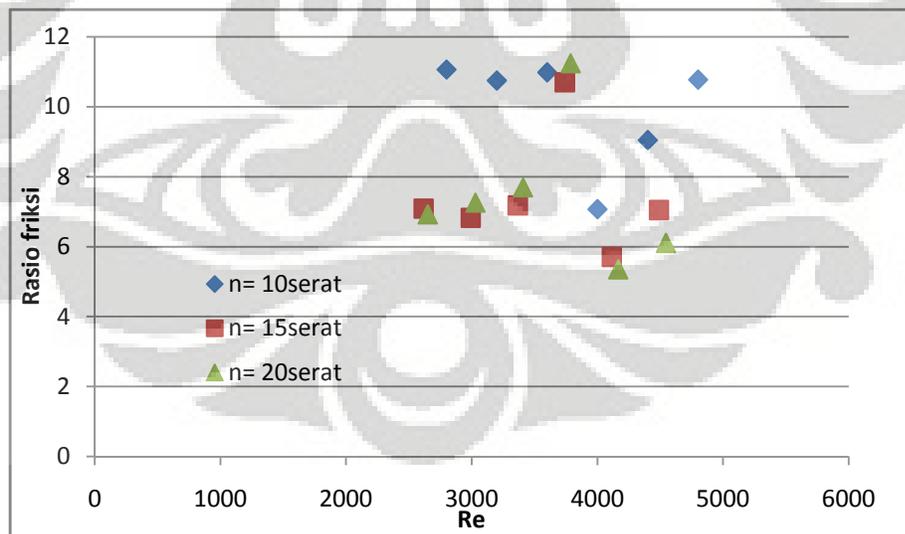
Gambar 4. 15 Hubungan bilangan Reynolds terhadap faktor friksi

Dari Gambar 4.15 dapat dilihat hubungan bilangan Reynolds dengan faktor friksi. Untuk aliran yang bersifat laminar, bilangan Reynolds berbanding terbalik dengan faktor friksi. Pada kondisi laminar, semakin tinggi bilangan Reynolds maka faktor friksi yang dihasilkan akan semakin rendah tetapi friksi yang dihasilkan semakin besar seperti telah dijelaskan sebelumnya. Sedangkan untuk kondisi aliran

turbulen, bilangan Reynolds berbanding lurus dengan faktor friksi. Semakin tinggi bilangan Reynolds maka faktor friksi yang dihasilkan akan semakin tinggi pula dan friksi yang dihasilkan pun semakin besar.

Gambar 4.15 juga dapat menunjukkan pengaruh jumlah serat terhadap faktor friksi. Semakin banyak jumlah serat di dalam modul maka faktor friksi yang dihasilkan akan semakin rendah. Hubungan ini berlaku untuk kondisi aliran laminar maupun aliran turbulen. Hal ini disebabkan adanya pengaruh diameter ekuivalen yang berhubungan dengan *void fraction* (fraksi kekosongan). Semakin banyak jumlah serat maka fraksi kekosongan (ϵ) di dalam modul akan semakin rendah dan mengakibatkan faktor friksi yang dihasilkan semakin rendah juga.

Selain faktor friksi dalam modul, perhitungan friksi literatur juga dilakukan untuk membandingkan besar friksi yang terbentuk dengan friksi literatur. Friksi literatur itu sendiri hanya dipengaruhi oleh jenis aliran yang terjadi di dalam modul. Perbandingan antara friksi di dalam modul dengan friksi literatur disebut rasio friksi. Hubungan antara bilangan Reynolds dengan rasio friksi dapat dilihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4. 16 Hubungan bilangan Reynolds terhadap rasio friksi

Dari Gambar 4.16 dapat dilihat bahwa pada aliran fluida yang bersifat laminar, peningkatan bilangan Reynolds akan cenderung menurunkan rasio friksi sedangkan pada aliran fluida yang bersifat turbulen peningkatan bilangan Reynolds akan meningkatkan rasio friksi. Peningkatan rasio friksi pada aliran turbulen disebabkan besarnya perubahan faktor friksi pada modul lebih tinggi dibandingkan perubahan nilai friksi yang didapat dari perhitungan literatur yang hanya dipengaruhi oleh bilangan Reynolds saja.

Berdasarkan Gambar 4.16 dapat dilihat bahwa nilai rasio friksi berada pada rentang 5-11. Misalkan pada modul 10 serat dengan bilangan Reynolds 2801 mempunyai rasio friksi 11,06. Hal ini berarti bahwa friksi yang terjadi selama eksperimen (friksi modul) lebih besar dibandingkan friksi yang seharusnya terjadi (friksi literatur) disebabkan nilai faktor friksi pada eksperimen dipengaruhi oleh banyak faktor seperti tahanan pada membran, geometris membran, keberadaan zat-zat pengotor di dalam modul, sambungan antara pipa dengan acrylic dan gesekan dengan permukaan membran. Seperti telah dibahas sebelumnya, meningkatnya friksi atau gesekan akan meningkatkan energi kinetik dan penurunan tekanan yang terjadi di dalam modul. Dengan demikian besarnya energi kinetik dan penurunan tekanan dalam modul saat eksperimen akan bernilai 11x lebih besar dibandingkan pada literatur yaitu saat kondisi pipa halus.

4.4 Analisa Sampel

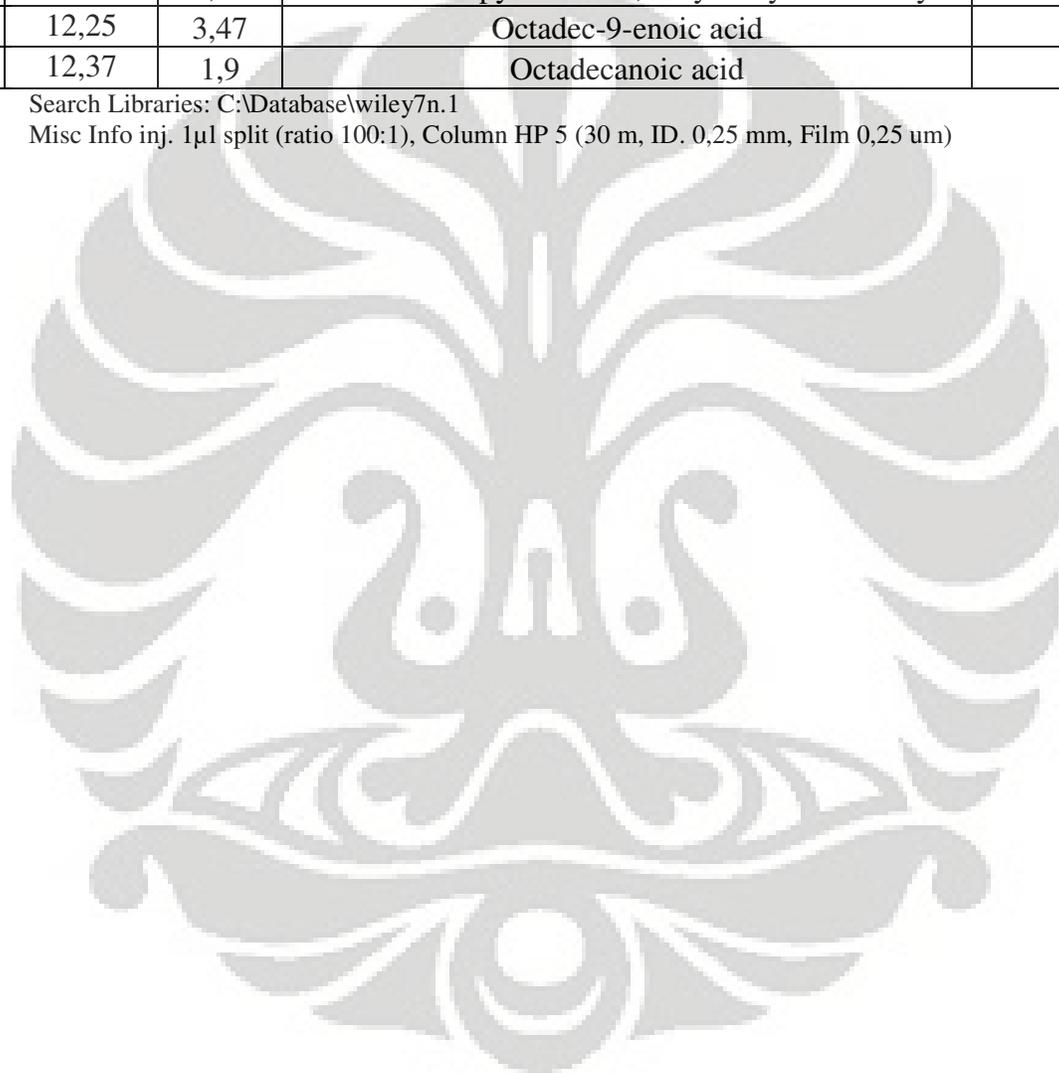
Untuk mengetahui pengaruh-pengaruh dari komponen senyawa-senyawa kimia di dalam buah mengkudu terhadap absorpsi CO₂ maka dilakukan analisa sampel. Metode yang digunakan adalah metode GC/MS. Metode GC/MS digunakan untuk mengetahui senyawa kimia yang mempengaruhi proses absorpsi CO₂ secara kualitatif. Tabel 4.2 menunjukkan kandungan senyawa kimia di dalam buah mengkudu sebelum absorpsi CO₂. Dan Tabel 4.3 menunjukkan kandungan senyawa kimia di dalam buah mengkudu sesudah absorpsi CO₂.

Tabel 4.2 Hasil analisa sari buah mengkudu awal dengan GC/MS

Peak	Retention Time	% Area	Library/ ID	Match Quality (%)
5	5	53,65	Octanoic acid	95
7	5,46	2,91	2-Furancarboxaldehyde, 5-(hydroxymethyl)	72
10	6,45	0,71	2-Methyl-1-thiacyclohept-2-ene 1-oxide \$\$ Thiepin	83
11	6,59	1,81	Decanoic acid	96
27	11,11	5,46	n-Hexadecanoic acid	98
29	11,36	3,96	2H-1-Benzopyran-2-one, 7-hydroxy-6-methoxy	96
30	12,25	3,47	Octadec-9-enoic acid	92
31	12,37	1,9	Octadecanoic acid	99

Search Libraries: C:\Database\wiley7n.1

Misc Info inj. 1µl split (ratio 100:1), Column HP 5 (30 m, ID. 0,25 mm, Film 0,25 um)



Tabel 4.3 Hasil analisa sari buah mengkudu setelah absorpsi CO₂ dengan GC/MS

Peak	Retention Time	% Area	Library/ ID	Match Quality (%)
3	4,71	2,41	4H-Pyran-4-one, 2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl	80
4	4,91	54,05	Octanoic acid	90
9	6,58	1,57	Decanoic acid	94
17	10,87	0,75	Hexadecanoic acid	83
19	11,11	8,83	Hexadecanoic acid (CAS) \$\$ Palmitic acid	99
20	11,36	2,96	2H-1-Benzopyran-2-one, 7-hydroxy-6-methoxy	96
21	12,25	1,5	9-Octadecenoic acid, (E)-\$\$ trans-delta(sup 9)	92
23	12,36	3,05	Octadecanoic acid (CAS) \$\$ Stearic acid	90

Search Libraries: C:\Database\wiley7n.1

Misc Info inj. 1µl split (ratio 100:1), Column HP 5 (30 m, ID. 0,25 mm, Film 0,25 um)

Dari Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 dapat diketahui senyawa-senyawa di dalam buah mengkudu yang kemungkinan mempengaruhi proses absorpsi CO₂ yaitu 2-Furancarboxaldehyde, 5-(hydroxymethyl) dan 2-Methyl-1-thiacyclohept-2-ene 1-oxide (Thiepin). Hal ini disebabkan kedua senyawa ini terdapat di dalam analisa awal sari buah mengkudu tetapi tidak terdapat di analisa sari buah mengkudu setelah absorpsi CO₂. 2-Furancarboxaldehyde, 5-(hydroxymethyl) memiliki rumus molekul C₆-H₆-O₃ dan berat molekul 126,11 g/mol sedangkan 2-Methyl-1-thiacyclohept-2-ene 1-oxide (Thiepin) memiliki rumus molekul C₆-H₆-S dan berat molekul 110,18 g/mol. Dengan adanya senyawa yang hilang setelah mengabsorb CO₂, maka sebagai kesimpulan awal, yaitu senyawa tersebut telah bereaksi dengan CO₂. Namun kemungkinan terjadinya reaksi kecil sekali mengingat absorpsi yang terjadi pada pelarut buah mengkudu adalah absorpsi fisik, dan berarti tidak ada reaksi yang terjadi dalam absorpsi. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui lebih pasti senyawa di dalam buah mengkudu yang berperan dalam absorpsi CO₂.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari pembahasan di atas adalah:

1. Pelarut buah mengkudu tidak berpotensi untuk dijadikan sebagai absorben gas CO₂ disebabkan sifat buah mengkudu itu sendiri adalah asam.
2. Efektivitas modul membran dalam mengabsorp CO₂ dipengaruhi oleh jumlah serat membran dan perpindahan massa secara umum dipengaruhi oleh jumlah serat membran dan laju alir pelarut.
3. Korelasi perpindahan massa CO₂ oleh pelarut buah mengkudu yang terjadi di dalam kontaktor membran adalah $Sh = 0,704 \varphi^{-0,61} \cdot Re^{0,51}$ untuk dosis 100 gr buah mengkudu per liter air Pangkat Re lebih dari 0,5 menunjukkan aliran pelarut yang terjadi cenderung turbulen.
4. Koefisien perpindahan massa CO₂ pada pelarut air dapat mencapai hingga $4,26 \times 10^{-5}$ m/s sedangkan koefisien perpindahan massa CO₂ pada pelarut buah mengkudu dapat mencapai hingga $4,52 \times 10^{-5}$ m/s.
5. Pada studi perpindahan massa, kenaikan laju alir atau kecepatan linier pelarut akan meningkatkan nilai koefisien perpindahan massa.
6. Sebaliknya, semakin banyak jumlah serat di dalam modul akan menurunkan nilai koefisien perpindahan massa.
7. Pada studi hidrodinamika, kenaikan laju alir atau kecepatan linier akan meningkatkan penurunan tekanan di dalam modul akibat friksi dan peningkatan jumlah serat juga menyebabkan kenaikan penurunan tekanan di dalam modul.
8. Senyawa-senyawa di dalam buah mengkudu yang kemungkinan mempengaruhi proses absorpsi CO₂ yaitu 2-Furancarboxaldehyde, 5-(hydroxymethyl) dan 2-Methyl-1-thiacyclohept-2-ene 1-oxide (Thiepin).

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Pelarut buah mengkudu tidak cocok untuk mengabsorb gas asam karena sifat dari buah mengkudu itu sendiri adalah asam.
2. Perlu melakukan preparasi pelarut yang lain untuk dapat mengesktrak senyawa-senyawa kimia di dalam buah mengkudu.



DAFTAR REFERENSI

- _____, *Polypropylene*, www.wikipedia.org (Diakses tanggal 1 Mei 2008).
- _____, *2-Furancarboxaldehyde, 5-(hydroxymethyl)*, www.sciencelab.com
(Diakses tanggal 24 Juni 2009).
- _____, *2-Furancarboxaldehyde, 5-(hydroxymethyl)*, www.chemindustry.com
(Diakses tanggal 24 Juni 2009).
- _____, *Thiepine*, www.wikipedia.org (Diakses tanggal 24 Juni 2009).
- Al-Marzouqi, Mohamed H., et.al, *Modelling of CO₂ Absorption in Membrane Contactors* (UAE: Elsevier, Separation and Purification Technology, 2007).
- Atchariyawut, Supakorn., et.al, *Separation of CO₂ from CH₄ by Using Gas-Liquid Membrane Contacting Process* (Thailand: Elsevier, Journal of Membrane Science 304, 2007) hal. 163-172.
- Bird, R. Byron, et.al. *Transport Phenomena* (USA: John Wiley & Sons, 1960).
- Djauhariya, Endjo and Rosihan Rosman, *Status Perkembangan Teknologi Tanaman Mengkudu*, Balai Penelitian Tanaman Obat dan Aromatik.
- Gabelman, Alan and Sun-Tak Hwang, *Hollow Fiber Membrane Contactors* (Cincinnati: Elsevier, Journal of Membrane Science 159, 1999) hal. 61-106.
- Kartohardjono, S., *Hollow Fiber Membrane Contactor*, Kapita Selekt, Program Studi Teknik Kimia Universitas Indonesia, 2004.
- Li, Jing-Liang and Bing-Hung Chen, *Review of CO₂ Absorption Using Chemical Solvents in Hollow Fiber Membrane Contactors* (Singapore: Elsevier, Separation and Purification Technology 41, 2005) hal. 109-122.
- Lipnizki, Frank and Robert Field. *Mass Transfer Performance for Hollow Fiber Modules with Shell-Side Axial Feed Flow: Using an Engineering Approach to Develop a Framework*. (Journal of Membrane Science 193, 2001) hal. 195-208.
- Mulder, Marcel, *Basic Principles of Membrane Technology* (Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1997).

- Perry, R.H., Green D. M. Howe (eds.), *Perry's Chemical Engineerings' Handbook*, (McGraw Hill, 1999), hal. 20-22, 40-42.
- Qi., Zhang., E.L Cussler. *Microporous Hollow Fibers For Gas Absorption: Mass Transfer In The Liquid* (Minnesota: Elsevier, Journal of Membrane Science 23, 1985) hal.321-332.
- Sengupta, et.al., *Large-scale Application of Membrane Contactors for Gas Transfer From or To Ultrapure Water* (Elsevier: Separation and Purification Technology 14, 1998) hal. 189-200.
- Wang, R., et.al, *Modelling of CO₂ Capture by Three Typical Amine Solutions in Hollow Fiber Membrane Contactors* (Singapore: Elsevier, Chemical Engineering and Processing 43, 2004) hal. 849-856.
- Yan, Shui-Ping., et.al, *Experimental Study on Separation CO₂ from Flue Gas Using Hollow Fiber Membrane Contactors Without Wetting* (China: Elsevier, Fuel Processing Technology 88, 2007) hal. 501-511.

LAMPIRAN

Lampiran 1

Data Percobaan

1.4 Studi Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Air

1.4.1 Data Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Air Dengan Jumlah Serat 10

Laju alir gas CO₂ input = 180 sccm

pH awal = 6,41

Temperatur operasi = 25⁰C

No	Laju alir air (L/hr)	t bubbleflowmeter(s)	pH akhir
1	350	7,69	5,92
		7,63	
2	400	7,94	5,95
		7,92	
3	450	7,99	5,97
		8,23	
4	500	8,6	5,98
		8,66	
5	550	9,1	6,01
		9,13	
6	600	9,43	6,03
		9,35	

1.4.2 Data Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Air Dengan Jumlah Serat 15

Laju alir gas CO₂ input = 180 sccm

pH awal = 6,4

Temperatur operasi = 25⁰C

No	Laju alir air (L/hr)	t bubbleflowmeter(s)	pH akhir
1	350	9,81	5,65
		9,78	
2	400	10,75	5,71
		10,58	
3	450	11,4	5,78
		11,83	
4	500	12,87	5,82
		12,97	
5	550	13,97	5,85
		14,23	
6	600	16,08	5,87
		16,03	

1.4.3 Data Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Air Dengan Jumlah Serat 20

Laju alir gas CO₂ input = 180 sccm

pH awal = 6,4

Temperatur operasi = 25⁰C

No	Laju alir air (L/hr)	t bubbleflowmeter(s)	pH akhir
1	350	13,72	5,66
		13,76	
2	400	16,74	5,7
		16,85	
3	450	20,31	5,71
		19,75	
4	500	23,32	5,74
		23,81	
5	550	29,93	5,75
		29,45	
6	600	35,81	5,77
		36,13	

1.5 Studi Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu

1.5.1 Data Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu Dengan Jumlah Serat 10

Laju alir gas CO₂ input = 180 sccm

pH awal = 3,68

Temperatur operasi = 25⁰C

No	Laju alir larutan buah mengkudu(L/hr)	t bubbleflowmeter(s)	pH akhir
1	350	8,13	3,62
		8,2	
2	400	8,51	3,63
		8,46	
3	450	9,01	3,63
		8,85	
4	500	9,29	3,6
		9,25	
5	550	9,75	3,61
		9,9	
6	600	9,93	3,61
		9,96	

1.5.2 Data Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu Dengan Jumlah Serat 15

Laju alir gas CO₂ input = 180 sccm

pH awal = 3,65

Temperatur operasi = 25⁰C

No	Laju alir larutan buah mengkudu (L/hr)	t bubbleflowmeter(s)	pH akhir
1	350	10,8	3,53
		10,76	
2	400	11,66	3,54
		11,38	
3	450	14,07	3,55
		14,24	
4	500	14,92	3,55
		15,12	
5	550	17,07	3,56
		16,97	
6	600	18,71	3,6
		17,89	

1.5.3 Data Perpindahan Massa Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu Dengan Jumlah Serat 20

Laju alir gas CO₂ input = 180 sccm

pH awal = 3,65

Temperatur operasi = 25⁰C

No	Laju alir larutan buah mengkudu (L/hr)	t bubbleflowmeter(s)	pH akhir
1	350	17,27	3,63
		17,15	
2	400	19,19	3,61
		20,02	
3	450	25,5	3,61
		25,32	
4	500	28,3	3,6
		32,4	
5	550	43,2	3,6
		43,66	
6	600	60,03	3,61
		60	

1.6 Studi Hidrodinamika Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu

1.6.1 Data Hidrodinamika Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu Dengan Jumlah Serat 10

No	Laju alir (L/hr)	ΔP (in H ₂ O)		
		Data 1	Data 2	Data 3
1	350	23	23	22
2	400	24	23	23
3	450	26	24	23
4	500	32	30	29
5	550	36	39	37
6	600	45	45	46

1.6.2 Data Hidrodinamika Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu Dengan Jumlah Serat 15

No	Laju alir (L/hr)	ΔP (in H ₂ O)		
		Data 1	Data 2	Data 3
1	350	24	23	23
2	400	25	23	24
3	450	27	24	25
4	500	33	30	30
5	550	37	39	38
6	600	47	50	45

1.6.3 Data Hidrodinamika Menggunakan Pelarut Buah Mengkudu Dengan Jumlah Serat 20

No	Laju alir (L/hr)	ΔP (in H ₂ O)		
		Data 1	Data 2	Data 3
1	350	28	27	27
2	400	31	29	28
3	450	33	31	31
4	500	43	40	39
5	550	53	47	46
6	600	61	58	58

Lampiran 2

Contoh Perhitungan

2.4 Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa

Untuk mendapatkan nilai koefisien perpindahan massa, baik untuk pelarut air maupun untuk pelarut buah mengkudu digunakan persamaan:

$$k_l = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{A_m} \quad (2.1)$$

Dimana $A_m = n_f \cdot \pi \cdot d_f \cdot l$ (3.1)

Sebelum menghitung nilai koefisien perpindahan massa, langkah pertama yang dilakukan adalah mencari kondisi actual gas CO₂ input dengan persamaan:

$$Q_2 = \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \cdot Q_1 \quad (3.2)$$

Contoh data yang diperoleh pada pelarut buah mengkudu dengan modul 10 serat:

Laju alir gas CO ₂ input	= 180 sccm
pH awal	= 3,68
Temperatur operasi	= 25 ⁰ C
Temperatur <i>massflow meter</i>	= 21 ⁰ C
Volume <i>bubbleflow meter</i>	= 15 cc
Diameter <i>fiber</i>	= 2,7 mm
Panjang modul	= 40 cm

Laju alir larutan buah mengkudu(L/hr)	t bubbleflowmeter(s)	pH akhir
350	8,13	3,62
	8,2	

Nilai laju alir gas input pada kondisi actual dapat dicari dengan persamaan (3.2). Nilai yang didapatkan 182,4462 ccm.

Langkah selanjutnya adalah mencari nilai laju alir gas keluaran membran seperti pada tabel di bawah ini:

Qpelarut(L/hr)	t bubbleflowmeter(s)	t rata2 (s)	Q gas out membran(mL/s)	Q out(mL/min)
350	8,13	8,165	1,837109614	110,2265769
	8,2			

Selanjutnya mencari luas penampang membran dengan persamaan (3.1). Nilai yang didapatkan 339,12 cm². Setelah semua nilai diketahui maka nilai koefisien perpindahan massa dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2.1).

Koefisien perpindahan massa yang didapat 3,54936x10⁻⁰⁵ m/s.

2.5 Perhitungan Bilangan Reynolds dan Bilangan Sherwood

Untuk menghitung bilangan Reynolds dan bilangan Sherwood, maka perlu menggunakan persamaan-persamaan berikut:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v_l \cdot d_e}{\mu} \quad (2.4)$$

$$v_l = \frac{Q_l}{A_{flow}}$$

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

$$d_e = \frac{d_{o, fiber}}{\sqrt{1 - \varepsilon}} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon = 1 - n_{fiber} \left(\frac{d_{o, fiber}}{D_{i, modul}} \right)^2 \quad (2.6)$$

$$Sh = k \frac{d_e}{D} \quad (2.3)$$

Contoh data yang diperoleh pada pelarut buah mengkudu dengan modul 10 serat:

Diameter *fiber* = 0,0027 m

Diameter selongsong = 0,019 m

Laju alir pelarut = 350 L/hr

Massa jenis pelarut = 965,72 kg/m³

Viskositas pelarut pada 25⁰C = 8,904x10⁻⁴ kg/ms (Diasumsikan seperti air)

Difusivitas pelarut pada 25⁰C = 1,96x10⁻⁹ m²/s

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan-persamaan di atas dicari nilai-nilai yang dibutuhkan untuk mendapatkan bilangan Reynolds dan bilangan Sherwood.

Nilai-nilai tersebut dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

A_{flow} (m ²)	v_l (m/s)	ε	De (m)	Re	Sh
0,000226159	0,429885	0,798061	0,006008	2801,382	108,8048

2.6 Perhitungan Hidrodinamika

Untuk melakukan perhitungan hidrodinamika maka dibutuhkan persamaan (2.8)

hingga persamaan (2.10) dan persamaan (3.3).

Contoh data yang diperoleh pada modul 10 serat:

Laju alir (L/hr)	ΔP (in H ₂ O)			ΔP rata-rata (Pa)
	Data 1	Data 2	Data 3	
350	23	23	22	5645,641067

Selanjutnya mmebuat plot grafik antara v_L dengan ΔP rata-rata sehingga

didapatkan *intercept*. Nilai *intercept* ini digunakan untuk mengkalibrasi

penurunan tekanan agar dimulai saat titik nol. Nilai *intercept* yang didapat 4.145 sehingga diperoleh nilai ΔP yang baru adalah $5.645,641 - 4145 = 1.500,641$ Pa.

Data hidrodinamika selanjutnya diolah lebih lanjut untuk mendapatkan nilai friksi seperti pada tabel di bawah ini:

v_L (m/s)	f modul	friksi literatur	Rasio friksi
0,429885334	0,063151542	0,005711467	11,05697378

Lampiran 3

Hasil Perhitungan

3.7 Hasil Perpindahan Massa Untuk Modul 10 Serat

Pelarut Air

Qpelarut (L/hr)	v_L (m/s)	k(m/s)
350	0,429885334	3,19222E-05
400	0,491297524	3,38883E-05
450	0,552709715	3,51263E-05
500	0,614121905	3,84126E-05
550	0,675534096	4,11397E-05
600	0,736946286	4,25609E-05

Pelarut Buah Mengkudu

Qpelarut (L/hr)	v_L (m/s)	k(m/s)	Re	Sh
350	0,429885334	3,54936E-05	2801,382	108,8048189
400	0,491297524	3,75367E-05	3201,579	115,0677456
450	0,552709715	4,01344E-05	3601,777	123,0310275
500	0,614121905	4,19511E-05	4001,974	128,600103
550	0,675534096	4,46465E-05	4402,171	136,8626906
600	0,736946286	4,51897E-05	4802,369	138,52794

3.8 Hasil Perpindahan Massa Untuk Modul 15 Serat

Pelarat Air

Qpelarat (L/hr)	v_L (m/s)	k(m/s)
350	0,492152	2,96724E-05
400	0,562459	3,21283E-05
450	0,632766	3,43897E-05
500	0,703074	3,69541E-05
550	0,773381	3,88641E-05
600	0,843689	4,14107E-05

Pelarat Buah Mengkudu

Qpelarat (L/hr)	v_L(m/s)	k (m/s)	Re	Sh
350	0,492152	3,24232E-05	2618,623	81,15365
400	0,562459	3,41804E-05	2992,712	85,55169
450	0,632766	3,89454E-05	3366,801	97,47829
500	0,703074	4,01451E-05	3740,89	100,4811
550	0,773381	4,24521E-05	4114,979	106,2554
600	0,843689	4,3664E-05	4489,068	109,2886

3.9 Hasil Perpindahan Massa Untuk Modul 20 Serat**Pelarat Air**

Qpelarat (L/hr)	v_L (m/s)	k(m/s)
350	0,575511	2,87371E-05
400	0,657727	3,1665E-05
450	0,739943	3,37918E-05
500	0,822159	3,54481E-05
550	0,904374	3,73843E-05
600	0,98659	3,86848E-05

Pelarat Buah Mengkudu

Qpelarat (L/hr)	v_L(m/s)	k (m/s)	Re	Sh
350	0,575511	3,19825E-05	2651,907	69,3259
400	0,657727	3,35524E-05	3030,751	72,72879
450	0,739943	3,61296E-05	3409,595	78,31505
500	0,822159	3,75462E-05	3788,439	81,38586
550	0,904374	3,97409E-05	4167,283	86,14304
600	0,98659	4,11482E-05	4546,126	89,19344

3.10 Hasil Hidrodinamika Untuk Modul 10 Serat

Pelarut Buah Mengkudu

Qpelarut (L/hr)	ΔP (Pa)	Re	f	Friksi literatur	Rasio friksi
350	1500,641067	2801,382	0,063151542	0,005711467	11,05697378
400	1666,689333	3201,579	0,053700446	0,004997534	10,74538947
450	1915,761733	3601,777	0,048770778	0,004442252	10,97884053
500	3410,196133	4001,974	0,0703206	0,009945072	7,070899283
550	5153,702933	4402,171	0,087828855	0,009710906	9,044352411
600	7146,282133	4802,369	0,102334218	0,009501947	10,76981569

3.11 Hasil Hidrodinamika Untuk Modul 15 Serat

Pelarut Buah Mengkudu

Qpelarut (L/hr)	ΔP (Pa)	Re	f	Friksi literatur	Rasio friksi
350	1650,689	2618,62312	0,043274713	0,006110081	7,082510298
400	1816,738	2992,712137	0,03646508	0,005346321	6,820592881
450	2148,834	3366,801154	0,034078684	0,004752285	7,171009442
500	3560,244	3740,890171	0,045734585	0,004277057	10,69300382
550	5303,751	4114,979188	0,056307041	0,009876079	5,701355669
600	7628,427	4489,068205	0,068051458	0,009663566	7,042064536

3.12 Hasil Hidrodinamika Untuk Modul 20 Serat

Pelarut Buah Mengkudu

Qpelarut (L/hr)	ΔP (Pa)	Re	f	Friksi literatur	Rasio friksi
350	2514,978933	2651,907	0,04175654	0,006033394	6,920903869
400	3013,123733	3030,751	0,038302156	0,00527922	7,255268424
450	3594,292667	3409,595	0,036100619	0,00469264	7,69303012
500	5835,944267	3788,439	0,047478541	0,004223376	11,24184625
550	7828,523467	4167,283	0,052635738	0,009844944	5,346474137
600	10402,2716	4546,126	0,058769491	0,009633101	6,100786401

