



UNIVERSITAS INDONESIA

**POTENSI BUAH MENGGUDU
SEBAGAI PELARUT UNTUK MEMISAHKAN GAS CO₂
DARI GAS ALAM
MELALUI KONTAKTOR MEMBRAN SERAT BERLUBANG**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

**DESIANA SETIA BUDHIE
0806367853**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JANUARI 2011**

LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Desiana Setia Budhie

NPM : 0806367853

Tanda Tangan :

Tanggal : 7 Januari 2011

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Desiana Setia Budhie
NPM : 0806367853
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Potensi Buah Mengkudu sebagai Pelarut untuk Memisahkan Gas CO₂ dari Gas Alam melalui Kontaktor Membran Serat Berlubang

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1: Ir. Sutrasno Kartohardjono, MSc, PhD (.....)

Pembimbing 2: Ir. Yuliusman, M.Eng (.....)

Penguji : Ir. Eva Fathul Karamah, MT (.....)

Penguji : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT (.....)

Penguji : Kamarza Mulia, PhD (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Januari 2011

KATA PENGANTAR

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, 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., PhD., selaku dosen pembimbing 1, yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Ir. Yuliusman M. Eng, selaku dosen pembimbing 2, atas arahan dan sarannya yang sangat membantu;
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA., selaku ketua Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
4. Seluruh laboran Departemen Teknik Kimia, yang telah banyak membantu selama pelaksanaan penelitian;
5. Pihak PUSLABFOR MABES POLRI atas bantuannya dalam menganalisis sampel penelitian.
6. Orangtua dan saudara saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
7. Teman-teman Ekstensi Teknik Kimia 2008, dan sahabat yang telah membantu, baik secara material maupun spiritual.

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, 7 Januari 2011

Penulis

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

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

Nama : Desiana Setia Budhie
NPM : 0806367853
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-eksklusif Royalty - Free Right*)** atas skripsi saya yang berjudul:

Potensi Buah Mengkudu sebagai Pelarut untuk Memisahkan Gas Co₂ dari Gas Alam melalui Kontaktor Membran Serat Berlubang

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 7 Januari 2011

Yang menyatakan

(Desiana Setia Budhie)

ABSTRAK

Nama : Desiana Setia Budhie
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Potensi Buah Mengkudu sebagai Pelarut untuk Memisahkan Gas CO₂ dari Gas Alam melalui Kontaktor Membran Serat Berlubang

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas pelarut alam dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) untuk absorpsi gas CO₂ dari campurannya dengan CH₄ melalui kontaktor membran serat berlubang. Pelarut yang digunakan berasal dari buah mengkudu dengan dosis 100 gram per liter air. Hasil studi perpindahan massa, menunjukkan nilai koefisien perpindahan massa dan fluks perpindahan massa meningkat dengan meningkatnya laju alir pelarut dan menurun dengan bertambahnya jumlah serat yang terdapat di dalam kontaktor membran. Sedangkan untuk studi hidrodinamika, kenaikan laju alir pelarut dan jumlah serat akan menyebabkan meningkatnya penurunan tekanan di dalam kontaktor membran. Pada analisis sampel secara kuantitatif, komposisi CO₂ berkurang setelah proses absorpsi dan pada analisis sampel secara kualitatif, diperoleh pembuktian bahwa jenis absorpsi yang terjadi adalah absorpsi kimia.

Kata kunci: buah mengkudu, kontaktor membran serat berlubang

ABSTRACT

Name : Desiana Setia Budhie
Study Program : Chemical Engineering
Title : Potency of Noni's Fruit as Solvent for CO₂ Removal from Natural Gas through Hollow Fiber Membrane Contactor

The aims of the study is to evaluate the effectiveness of the solvent nature of the noni fruit (*Morinda citrifolia*) for absorption of CO₂ gas from its mixture with CH₄ through hollow fiber membrane contactors. Solvents used were obtained from noni fruit with a dose of 100 grams per liter of water. The experimental results showed that mass transfer coefficients and fluxes increased with increasing solvent flow rate and decreased with increasing the number of fibers in the membrane contactor. Meanwhile, hydrodynamics study showed that an increase in solvent flow rate and the number of fiber in the contactor will increase in pressure drops of fluids flowing in membrane contactors. In the quantitative analysis of samples, the composition of CO₂ reduced after absorption process and in the qualitative analysis of samples indicated the type of absorption is chemical absorption.

Key words: noni fruit, hollow membran contactor, mass transfer coefficients, pressure drops.

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.....	xii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tanaman Mengkudu	5
2.1.1 Klasifikasi Mengkudu	5
2.1.2 Komposisi dan Kegunaan Tanaman Mengkudu	7
2.2 Absorpsi.....	10
2.3 Pemisahan Gas CO ₂ dari Gas Alam	11
2.3.1 Absorpsi Gas CO ₂ dari Gas Alam Menggunakan Absorber.....	12
2.3.2 Absorpsi Gas CO ₂ dari Gas Alam dengan menggunakan Kontaktor Membran.....	13
2.3.2.1 Membran Polipropilen.....	15
2.3.2.2 Kontaktor membran serat berlubang.....	17
2.3.2.3 Studi Perpindahan Massa pada Kontaktor Membran Serat Berlubang	20
2.3.2.4 Studi Hidrodinamika pada Kontaktor Membran Serat Berongga.....	23
2.4 Penelitian Sebelumnya.....	24
3. METODE PENELITIAN	25
3.1 Pendahuluan	25
3.2 Diagram Alir Penelitian.....	25
3.3 Skema Alat	28
3.4 Deskripsi Alat dan Bahan Penelitian.....	29
3.4.1 Peralatan.....	29
3.4.2 Bahan	30
3.5 Prosedur Penelitian.....	31
3.6 Kondisi Operasi.....	32
3.7 Pengolahan Data.....	32
3.7.1 Tabel Data Pengamatan.....	32
3.7.2 Koefisien Perpindahan Massa	33

3.7.3 Korelasi Perpindahan Massa	34
3.7.4 Studi Hidrodinamika	35
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Pendahuluan	37
4.2 Studi Perpindahan Massa	37
4.2.1 Proses Absorpsi	38
4.2.2 Pengaruh Laju Alir Pelarut.....	39
4.2.3 Pengaruh Jumlah Serat.....	41
4.2.4 Jenis Absorpsi	42
4.3 Korelasi Perpindahan Massa	43
4.4 Studi Hidrodinamika	47
4.5 Analisis Sampel.....	51
5. KESIMPULAN.....	54
5.1 Kesimpulan.....	54
5.2 Saran	54

DAFTAR REFERENSI

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Klasifikasi Ilmiah dari Tanaman Mengkudu	6
Tabel 2.2 Kandungan Kimia pada Setiap Bagian Tanaman Mengkudu	8
Tabel 2.3 Kandungan nutrisi dalam 100 gram buah mengkudu	9
Tabel 2.4 Hasil Penelitian Sebelumnya	24
Tabel 4.1 Koefisien dan Fraksi Kepadatan Membran Setiap Kontaktor	44
Tabel 4.2 Hasil Analisis Komposisi CO ₂ dengan Input Gas Campuran CO ₂ dan CH ₄	24
Tabel 4.3 Komposisi Kimia Buah Mengkudu Sebelum Menyerap CO ₂	52
Tabel 4.4 Komposisi Kimia Buah Mengkudu Setelah Menyerap CO ₂	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tanaman Mengkudu (<i>Morinda citrifolia</i>).....	5
Gambar 2.2 Prinsip Proses Pemisahan Gas CO ₂ dengan Menggunakan Pelarut Amina.....	13
Gambar 2.3 Absorpsi CO ₂ oleh Suatu Larutan Melewati Membran	14
Gambar 2.4 Pembasahan Kontaktor Membran: (a) Tidak Terjadi Pembasahan; (b) Terjadi Pembasahan	15
Gambar 2.5 Struktur Molekul Polipropilen	16
Gambar 2.6 Struktur Molekul Polipropilen Isotaktik	17
Gambar 2.7 Struktur Molekul Polipropilen Ataktik	17
Gambar 2.8 Kontaktor membran serat berlubang.....	18
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 3.2 Skema Alat Penelitian	28
Gambar 4.1 Skema Perpindahan Massa CO ₂ dari Fasa Gas ke Fasa Cair	39
Gambar 4.2 Variasi koefisien perpindahan massa, k_L , untuk kontaktor dengan jumlah serat 5 (▲), 12 (■) dan 16 buah (●), terhadap kecepatan linier cairan, v_L	39
Gambar 4.3 Variasi fluks perpindahan massa, J_{CO_2} , untuk kontaktor dengan jumlah serat 5 (▲), 12 (■) dan 16 buah (●), terhadap kecepatan linier, v_L	41
Gambar 4.4 Variasi bilangan Sherwood, Sh , untuk kontaktor dengan jumlah serat 5 (▲), 12 (■) dan 16 buah (●), terhadap bilangan Reynolds, Re	44
Gambar 4.5 Perbandingan bilangan Re^b terhadap bilangan Sherwood pada variasi laju alir dan jumlah serat	44
Gambar 4.6 Variasi Fungsi Geometri, a , Terhadap Fraksi Kepadatan Membran untuk Setiap Kontaktor, ϕ	45
Gambar 4.7 Variasi Bilangan Sherwood Hasil Eksperimen (■) dan Model (Garis) Terhadap Bilangan Reynolds pada Kontaktor dengan Jumlah Serat 5 Buah	46

Gambar 4.8 Variasi Bilangan Sherwood Hasil Eksperimen (■) dan Model (Garis) Terhadap Bilangan Reynolds pada Kontaktor dengan Jumlah Serat 12 Buah	46
Gambar 4.9 Variasi Bilangan Sherwood Hasil Eksperimen (■) dan Model (Garis) Terhadap Bilangan Reynolds pada Kontaktor dengan Jumlah Serat 16 Buah	47
Gambar 4.10 Variasi Penurunan Tekanan Cairan yang Melewati Kontaktor Membran, ΔP , untuk Kontaktor dengan Jumlah Serat 5 (▲), 12 (■) dan 16 Buah (●), Terhadap Kecepatan Linier, V_1	48
Gambar 4.11 Variasi Penurunan Tekanan Cairan yang Melewati Kontaktor Membran, ΔP , Untuk Kontaktor dengan Jumlah Serat 5 (▲), 12 (■) dan 16 Buah (●), Terhadap Bilangan Reynolds, Re	49
Gambar 4.12 Variasi Faktor Friksi, f , untuk Kontaktor dengan Jumlah Serat 5 (▲), 12 (■) dan 16 Buah (●), Terhadap Bilangan Reynolds, Re	50
Gambar 4.13 Variasi Rasio Faktor Friksi, F , untuk Kontaktor dengan Jumlah Serat 5 (▲), 12 (■) dan 16 Buah (●), Terhadap Bilangan Reynolds, Re	51

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Percobaan	59
1.1 Studi Perpindahan Massa	59
1.1.1 Data perpindahan massa untuk jumlah serat 16.....	59
1.1.2 Data perpindahan massa untuk jumlah serat 12.....	59
1.1.3 Data perpindahan massa untuk jumlah serat 5.....	60
1.2 Studi Hidrodinamika	60
1.2.1 Data hidrodinamika untuk jumlah serat 16.....	60
1.2.2 Data hidrodinamika untuk jumlah serat 12.....	60
1.2.3 Data hidrodinamika untuk jumlah serat 5.....	61
Lampiran 2 Contoh Pengolahan Data	61
2.1 Pengolahan Data Koefisien Perpindahan Massa	61
2.2 Pengolahan Data Korelasi Perpindahan Massa.....	62
2.3 Pengolahan Data Hidrodinamika	62
Lampiran 3 Hasil Pengolahan Data	63
3.1 Studi Perpindahan Massa	63
3.1.1 Hasil pengolahan data perpindahan massa untuk jumlah serat 16.....	63
3.1.2 Hasil pengolahan data perpindahan massa untuk jumlah serat 12.....	64
3.1.3 Hasil pengolahan data perpindahan massa untuk jumlah serat 5.....	64
3.2 Studi Hidrodinamika	65
3.2.1 Hasil pengolahan data hidrodinamika untuk jumlah serat 16.....	65
3.2.2 Hasil pengolahan data hidrodinamika untuk jumlah serat 12.....	65
3.2.3 Hasil pengolahan data hidrodinamika untuk jumlah serat 5.....	65
Lampiran 4 Hasil Analisis Sampel dengan GC TCD.	66
Lampiran 5 Hasil Analisis Sampel dengan GC/MS.....	67
5.1 Analisis Sampel Sebelum Absorpsi CO ₂	67
5.2 Analisis Sampel Setelah Absorpsi CO ₂	73

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tanaman mengkudu merupakan jenis tumbuhan yang banyak terdapat di Indonesia. Nama botaninya adalah *Morinda citrifolia*. Tanaman yang juga dikenal dengan sebutan buah Pace atau Noni ini berwarna hijau di saat muda dan berubah putih kekuningan jika mulai matang. Permukaan kulit buahnya berbintil dan dipenuhi mata berwarna coklat kehitaman, rasanya sangat asam dengan aroma khas sangat tajam ketika tua dan matang. Tanaman yang selama ini dikenal sebagai tumbuhan liar dan berbau busuk, kini berubah menjadi buah “ajaib” yang banyak dicari.

Kepopuleran mengkudu tidak terlepas dari hasil riset beberapa penelitian yang menyatakan bahwa zat yang terkandung di dalam mengkudu sangat bermanfaat untuk aspek kesehatan. Riset ilmiah menunjukkan bahwa kandungan zat di dalam buah mengkudu memiliki khasiat untuk meningkatkan daya tahan tubuh, menormalkan tekanan darah, melawan tumor dan kanker, menghilangkan rasa sakit, anti peradangan, anti alergi dan anti bakteri (Waha, 2001)

Pemanfaatan tanaman mengkudu untuk tujuan kesehatan sudah banyak dilakukan, sementara untuk kepentingan industri, khususnya industri kimia, masih belum ada yang menelitinya. Salah satu potensi yang dapat diharapkan dari tanaman mengkudu untuk industri kimia adalah sebagai pelarut untuk menyerap gas. Hal tersebut dikarenakan pada bagian buah mengkudu terdapat komponen-komponen kimia yang diprediksi dapat memicu proses absorpsi, yaitu golongan alkohol, ester dan amida. Proses penyerapan gas ini nantinya dapat diaplikasikan baik dalam industri gas dan perminyakan maupun industri kimia lainnya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi tanaman mengkudu (*Morinda citrifolia*) dalam menyerap gas CO₂ dari campurannya dengan CH₄ melalui kontaktor membran serat berlubang. Modul membran serat berlubang merupakan salah satu alternatif peralatan yang dapat digunakan sebagai kontaktor gas-cair yang memberikan rasio antara luas permukaan kontak dan volume

peralatan yang besar. Sistem membran ini memiliki memiliki luas permukaan kontak per volume yang lebih besar dibanding jika menggunakan *packed & tray column*. Luas kontak membran mencapai $1600-6600 \text{ m}^2/\text{m}^3$, jauh lebih besar jika dibandingkan *packed & traycolumn* $30-300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Mulder, 1997)

Proses ini dapat diaplikasikan pada industri gas dan petrokimia terutama untuk menghilangkan gas CO_2 yang terdapat di dalam aliran gas alam, dimana gas alam ini merupakan bahan utama yang digunakan pada industri tersebut. CO_2 harus dihilangkan dari gas alam terutama untuk meningkatkan nilai kalor gas alam tersebut dan mencegah korosi pada sistem perpipaan selama transportasi dan distribusinya.

Membran yang digunakan sebagai kontaktor gas-cair dalam penelitian ini merupakan membran serat berongga (*hollow fiber membrane*), yang terbuat dari polipropilen yang bersifat hidrofobik. Dengan membran ini, air tidak akan membasahi membran dan pori-pori membran akan terisi oleh gas sehingga memberikan difusivitas yang tinggi. Membran polipropilene merupakan material yang paling banyak digunakan untuk aplikasi kontaktor membran, disamping karena harganya yang relatif murah, material ini juga memiliki ketahanan mekanik dan resistansi terhadap sifat kimia pelarut yang baik (Kumar, 2002)

Prinsip dasar sistem membran sebagai kontaktor adalah tidak terjadi dispersi dari satu fasa ke fasa lainnya atau tidak terjadi kontak langsung antara kedua fasa. Pelarut dialirkan pada sisi membran sedangkan fluida yang memiliki komponen yang akan dihilangkan dialirkan pada sisi membran lainnya. Perpindahan massa terjadi dikarenakan adanya gaya pendorong (*driving force*) berupa beda konsentrasi.

Selama ini, proses penghilangan CO_2 di industri gas dan petrokimia dilakukan dengan cara absorpsi menggunakan larutan amina seperti monoetanolamin (MEA) dan dietanolamin (DEA). Proses absorpsi ini biasanya dilakukan dengan menggunakan kolom absorpsi yang bermasalah apabila laju alir gas dan cairannya terlalu besar (banjir) atau terlalu kecil (*unloading*), dan terbentuknya busa yang akan menurunkan luas permukaan kontak secara drastis yang pada akhirnya juga menurunkan kapasitas penyerapannya (Cooney dan Jackson, 1987). Penggunaan kontaktor membran dapat menghilangkan

kelemahan-kelemahan yang terdapat pada kontaktor konvensional yang menggunakan kolom absorpsi karena aliran gas dan cairannya tidak bercampur satu sama lainnya.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana efektivitas perpindahan massa CO_2 dari campurannya dengan CH_4 ke dalam pelarut yang berasal dari buah mengkudu di dalam kontaktor membran serat berlubang?
2. Bagaimana efek laju alir pelarut dan jumlah serat membran di dalam kontaktor terhadap koefisien perpindahan massa yang terjadi?
3. Bagaimana perpindahan massa dan hidrodinamika air dalam kontaktor membran serat berlubang untuk menyerap gas CO_2 dari campurannya dengan CH_4 ke dalam pelarut?
4. Bagaimana cara membuat suatu model persamaan sederhana yang mengkorelasikan koefisien perpindahan massa dengan karakteristik aliran fluida di dalam kontaktor membran serat berlubang?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas perpindahan massa CO_2 dari campurannya dengan CH_4 ke dalam pelarut yang berasal dari buah mengkudu di dalam kontaktor membran serat berlubang.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Modul membran yang digunakan adalah kontaktor membran serat berlubang.
2. Proses absorpsi menggunakan *feed* berupa gas alam dengan kandungan gas CO_2 sebesar 31 % dan CH_4 sebesar 69 %.
3. Proses absorpsi dilakukan dengan menggunakan larutan pelarut yang berasal dari buah mengkudu yang dilarutkan dengan air sebagai absorben bagi gas CO_2 .

4. Variabel proses yang divariasikan adalah laju alir umpan yang disirkulasikan selama proses pemisahan gas CO₂ dari campurannya dengan CH₄ dan jumlah serat di dalam modul membran.
5. Variabel tetap dalam penelitian ini adalah konsentrasi umpan, konsentrasi absorben, diameter modul membran, dan panjang modul membran.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan makalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

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

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berisi teori-teori pendukung tentang tanaman mengkudu, proses absorpsi, cara pemisahan gas CO₂ dari gas alam baik dengan menggunakan kolom absorber maupun dengan menggunakan kontaktor membran.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Berisi diagram alir prosedur penelitian, skema rangkaian alat, deskripsi alat dan bahan penelitian, prosedur penelitian, kondisi operasi dan pengolahan data penelitian.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi analisis dan pembahasan dari hasil penelitian dengan menampilkan pengolahan data yang telah diperoleh.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dari analisis dan pembahasan pada hasil penelitian.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanaman mengkudu

Selama ini sudah banyak tanaman yang berasal dari Indonesia yang digunakan dalam industri farmasi, akan tetapi masih sedikit sekali yang dimanfaatkan untuk keperluan industri khususnya industri kimia yang dapat memberikan nilai tambah yang besar. Pemanfaatan yang mungkin bisa didapatkan dari tanaman ini antara lain adalah sebagai bahan baku untuk produk kimia lainnya, adsorben dan pelarut untuk menyerap gas-gas yang tidak diinginkan. Kelebihan bahan kimia yang berasal dari tumbuhan dibandingkan bahan kimia sintesis terutama adalah ramah lingkungan dan dapat diperbaharui (*renewable*). Salah satu jenis tanaman yang dapat digunakan dalam proses kimia adalah tanaman mengkudu, dengan bentuk morfologi seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Tanaman mengkudu (*Morinda citrifolia*)

2.1.1 Klasifikasi Mengkudu

Terdapat sekitar 80 spesies tanaman yang termasuk dalam genus *Morinda*. Menurut H.B. Guppy, ilmuwan Inggris yang mempelajari Mengkudu sekitar tahun 1900, kira-kira 60 persen dari 80 spesies *Morinda* tumbuh di pulau-pulau besar maupun kecil, di antaranya Indonesia, Malaysia dan pulau-pulau yang terletak di

Lautan India dan Lautan Pasifik (Waha, 2001). Mengkudu merupakan tumbuhan asli Indonesia yang kemudian menyebar ke Asia Tenggara, India, Afrika, Amerika dan Australia (Lendri, 2003).

Spesies ini terdiri dari tiga varietas yaitu *citrifolia*, *bracteata*, dan *potteri*. Dengan *citrifolia*, menjadi yang paling terkenal (Nelson, 2001). Spesies ini mempunyai nama tersendiri di setiap negara, antara lain Noni di Hawaii, Nonu atau Nono di Tahiti, Cheese Fruit di Australia, Mengkudu atau Pace di Indonesia dan Malaysia. Klasifikasi ilmiah dari tanaman mengkudu diperlihatkan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Klasifikasi Ilmiah dari Tanaman Mengkudu

Klasifikasi Ilmiah	
Filum	Angiospermae
Sub filum	Dicotyledones
Divisi	Lignosae
Famili	Rubiaceae
Genus	Morinda
Spesies	<i>citrifolia</i>
Nama ilmiah	<i>Morinda citrifolia</i>

Sumber: Waha, 2001

Mengkudu dapat tumbuh di dataran rendah sampai pada ketinggian tanah 1500 meter diatas permukaan laut. Berikut ini ciri-ciri umum dari bagian tanaman mengkudu (Bangun dan Sarwono, 2002):

1. Pohon

Pohon mengkudu tidak begitu besar, tingginya antara 4 - 6 m. Batang bengkok-bengkok, berdahan kaku, kasar, dan memiliki akar tunggang yang tertancap dalam. Kulit batang coklat keabu-abuan atau coklat kekuning-kuningan, berbelah dangkal, tidak berbulu, anak cabangnya bersegi empat. Tajuknya selalu hijau sepanjang tahun. Kayu mengkudu mudah sekali dibelah setelah dikeringkan.

2. Daun

Berdaun tebal mengkilap. Daun mengkudu terletak berhadap-hadapan. Ukuran daun besar-besar, tebal, dan tunggal. Bentuknya jorong-lanset, berukuran 15 - 50 x 5 - 17 cm dengan tepi daun rata dan ujung lancip pendek. Pangkal daun berbentuk pasak. Urat daun menyirip. Warna hijau mengkilap, tidak berbulu. Pangkal daun pendek, berukuran 0,5 - 2,5 cm. Ukuran daun penumpu bervariasi, berbentuk segi tiga lebar.

3. Bunga

Bunga mengkudu bertipe bonggol bulat, bergagang 1 - 4 cm. Bunga tumbuh di ketiak daun penumpu yang berhadapan dengan daun yang tumbuh normal. Bunganya berkelamin dua. Mahkota bunga putih, berbentuk corong, panjangnya bisa mencapai 1,5 cm. Benang sari tertancap di mulut mahkota. Kepala putik berputing dua. Bunga itu mekar dari kelopak berbentuk seperti tandan. Bunganya putih dan harum.

4. Buah

Kelopak bunga tumbuh menjadi buah bulat lonjong sebesar telur ayam bahkan ada yang berdiameter 7,5 - 10 cm. Permukaan buah seperti terbagi dalam sel-sel poligonal (segi banyak) yang berbintik-bintik dan berkulit. Mula-mula buah berwarna hijau, menjelang masak menjadi putih kekuningan. Setelah matang, warnanya putih transparan dan lunak. Daging buah tersusun dari buah-buah batu berbentuk piramida, berwarna cokelat merah. Setelah lunak, daging buah mengkudu banyak mengandung air yang aromanya seperti keju busuk. Bau itu timbul karena pencampuran antara asam kaprik dan asam kaproat yang berbau tengik dan asam kaprilat yang rasanya tidak enak.

2.1.2 Komposisi dan Kegunaan Tanaman Mengkudu

Tanaman mengkudu mengandung berbagai vitamin, mineral, enzim, alkaloid, ko - faktor dan sterol tumbuhan yang terbentuk secara alamiah (Waha, 2001). Komposisi kimia yang terkandung dalam tiap bagian mengkudu tertera pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kandungan Kimia pada Setiap Bagian Tanaman Mengkudu

Bagian Tanaman	Kandungan kimia
Pada seluruh bagian	Alizarin, alizarin-alfa-metil eter, antraquinon, asperulosida, asam hexanoat, morindadiol, morindon, morindogenin, asam oktanoat, asam ursolat.
Daun	Asam amino (alanin, arginin, asam aspartat, sistein, sistin, glisin, asam glutamat, histidin, leusin, isoleusin, metionin, fenilalamin, prolin, serin, threonin, triptopan, tirosin, valin), mineral (kalsium, besi, fosfor), vitamin (asam askorbat, beta caroten, niasin, riboflavin, tiamin, betasitosterol, asam ursolat), alkaloid (antraquinon, glikosida, resin).
Bunga	5,7-dimetil-apiganin-4-o-beta-d(+)-galaktopiranosid, 6,8-dimetoksi-3-metil-antraquinon-1-o-beta-ramnosil-glukopiranosida, acasetin-7-o-beta-d(+)-glukopiranosida.
Buah	Asam askorbat, asam asetat, asperulosida, asam butanoat, asam benzoat, benzil alkohol, 1-butanol, asam kaprilat, asam dekanoat, (E)-6-dodekeno-gamma-laktona, (z,z,z)-8,11,14-asam ekosatrinoat, asam elaidat, etil dekanoat, etil-ektanoat, etil benzena, eugenol, glukosa, asam heptanoat, 2-heptanon, hexanal, hexanamida, asam hexaneudioat, asam hexanoat, 1-hexanol, 3-butan-1-ol, metil dekanoat, 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, L.asperuloside, alizarin, antraquinon, proxeronin, damnacanthal.

(Tabel 2.2 lanjutan...)

Bagian Tanaman	Kandungan kimia
Akar	Asperulosids, damnacanthal, morindadiol, morindin, morindon, nordamnacanthal, rubiadin, rubiadin monometil eter, soranjidiol, antraquinon, glikosida, zat getah, resin sterol
Kulit	Alizarin, klororubin, glikosida, (pentosa, hexosa), morindadiol, morindanigrin, morindin, morindon, zat resin, rubiadin monometil eter, soranjidiol
Kayu	Antragalol-2,3-dimetil eter

Sumber: Djauhariya dan Rosman, 2004

Menurut Winarti (2005), buah mengkudu mengandung berbagai senyawa yang penting bagi kesehatan, dengan komposisi yang dapat dilihat pada Tabel 2.3. Hasil penelitian membuktikan bahwa buah mengkudu mengandung senyawa metabolit sekunder yang sangat bermanfaat bagi kesehatan, selain kandungan nutrisinya yang juga beragam seperti vitamin A, C, niasin, tiamin dan riboflavin, serta mineral seperti zat besi, kalsium, natrium, dan kalium.

Tabel 2.3 Kandungan nutrisi dalam 100 gram buah mengkudu

Jenis nutrisi	Jumlah
Kalori (kal)	167
Vitamin A (IU)	395,83
Vitamin C (mg)	175
Niasin (mg)	2,50
Tiamin (mg)	0,70
Riboflavin (mg)	0,33
Besi (mg)	9,17
Kalsium (mg)	325

(Tabel 2.3 lanjutan...)

Jenis nutrisi	Jumlah
Natrium (mg)	335
Kalium (mg)	1,12
Protein (g)	0,75
Lemak (g)	1,50
Karbohidrat (g)	51,67

Sumber: Winarti (2005)

Buah dengan tingkat kematangan yang berbeda mempunyai kandungan bahan aktif dan khasiat yang berbeda pula. Hasil analisis komponen asam lemak yang dilakukan oleh Antara *et al.* (2001) menunjukkan bahwa buah dengan tingkat kematangan yang berbeda mengandung asam lemak yang berbeda pula. Kandungan asam lemak kaprilat dan kaproat terendah, masing-masing 0,022 % dan 0,008 %, terdapat pada buah yang masih mentah (berwarna hijau, mengkal, tekstur masih keras), kemudian meningkat pada buah matang (lunak) berturut-turut 0,184 % dan 0,457 %.

Kelebihan mengkudu jika digunakan sebagai absorben diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Jumlahnya melimpah di alam sehingga mudah didapat
2. Bersifat ramah lingkungan karena merupakan pelarut alami.
3. Tidak korosif dan harganya jauh lebih murah jika dibandingkan dengan menggunakan pelarut kimiawi seperti pelarut amina.

2.2 Absorpsi

Absorpsi merupakan salah satu operasi pemisahan dalam industri kimia dimana suatu campuran gas dikontakkan dengan suatu cairan penyerap yang sesuai, sehingga satu atau lebih komponen dalam campuran gas larut dalam cairan penyerap (Kumoro dan Hadiyanto, 2000). Absorpsi dapat berlangsung dalam dua macam proses, yaitu absorpsi fisik dan absorpsi kimia. Absorpsi fisik merupakan absorpsi dimana gas terlarut dalam cairan penyerap tanpa disertai dengan reaksi kimia. Penyerapan gas oleh pelarut terjadi karena adanya interaksi fisik. Absorpsi

kimia merupakan absorpsi dimana gas terlarut dalam larutan penyerap disertai dengan reaksi kimia. Absorpsi kimia dalam fasa cair sering digunakan untuk mengeluarkan zat terlarut dengan lebih sempurna dari campuran gasnya. Suatu keuntungan dalam absorpsi kimia adalah dengan adanya reaksi kimia, maka nilai koefisien perpindahan massanya menjadi lebih besar dibandingkan absorpsi tanpa reaksi kimia (Meldon, 1999).

Selama proses absorpsi, molekul dari zat yang diabsorpsikan masuk ke antara molekul bahan penyerap yang hasilnya akan terjadi sistem yang homogen. Hal ini berarti kepekatan dari molekul yang diserap di dalam bahan absorpsi tersebar merata sepanjang bahan absorpsi tersebut. Absorpsi biasanya dilakukan untuk tujuan tertentu sebagai berikut:

1. Memperoleh zat yang bernilai tinggi dari suatu campuran gas atau uap.
2. Mengeluarkan campuran tambahan yang tidak diinginkan dari produk yang berbentuk gas.
3. Pembentukan persenyawaan kimia dari suatu bahan absorpsi dan suatu komponen tertentu dari campuran gas.

Pada proses absorpsi, pemilihan larutan penyerap akan mempengaruhi proses absorpsi. Berikut ini adalah hal-hal yang harus dipertimbangkan dalam pemilihan pelarut untuk proses absorpsi (Treybal, 1981):

1. Kelarutan gas yang tinggi akan meningkatkan laju absorpsi dan mengurangi jumlah pelarut yang dibutuhkan.
2. Pelarut harus memiliki tekanan uap yang rendah.
3. Tidak korosif.
4. Harga pelarut yang murah dan mudah didapatkan akan lebih menguntungkan,
5. Viskositas yang rendah lebih disukai untuk laju absorpsi yang cepat.
6. Pelarut sebaiknya tidak beracun, tidak mudah terbakar, dan stabil.

2.3 Pemisahan Gas CO₂ dari Gas Alam

Gas alam merupakan campuran gas yang mudah terbakar yang mengandung senyawa-senyawa hidrokarbon dalam jumlah besar. Seperti minyak bumi dan batubara, gas alam juga merupakan bahan bakar fosil. Gas alam biasanya mengandung sebanyak 85 % metana (CH₄) dan sekitar 10 % etana

(C₂H₆), serta mengandung sejumlah kecil propana (C₃H₈), butane (C₄H₁₀), pentana (C₅H₁₂), dan alkana lainnya. Secara umum kandungan hidrokarbon di dalam gas alam bervariasi tergantung terutama pada lokasi *reservoir* gas alam. Gas alam mengandung sejumlah kecil senyawa-senyawa pengotor, termasuk didalamnya adalah karbon dioksida (CO₂), hidrogen sulfida (H₂S), dan nitrogen (N₂) (Wijanarko, 2005).

Karbon dioksida, yang termasuk ke dalam kategori gas asam (seperti halnya hidrogen sulfida) umumnya ditemukan di aliran gas alam pada tingkat paling tinggi 80 %. Jika bereaksi dengan air, maka akan sangat korosif dan merusak pipa serta peralatan dengan cepat. Karbon dioksida juga mengurangi nilai kalor dari gas alam. Dalam pabrik LNG, CO₂ harus dihilangkan untuk mencegah pembekuan pada suhu rendah (Dortmundt dan Doshi, 1999).

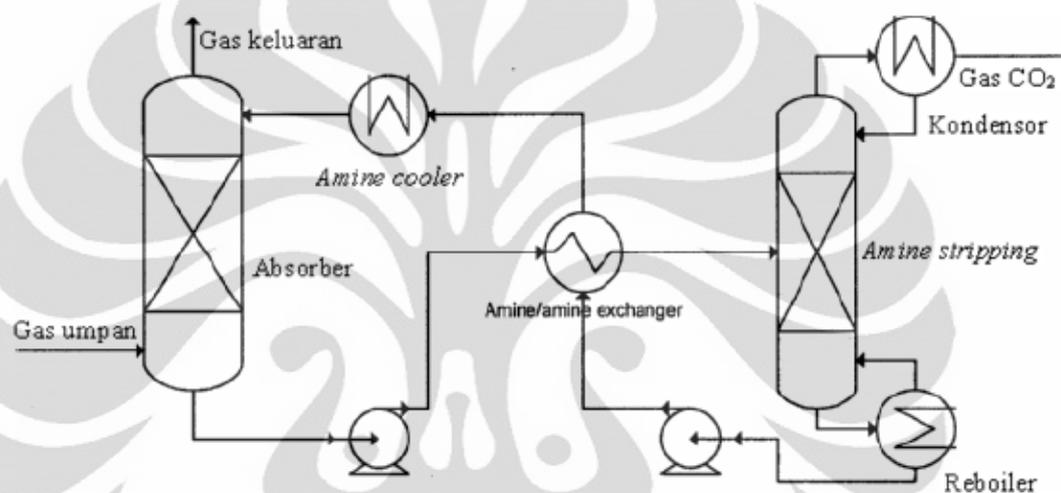
2.3.1 Absorpsi Gas CO₂ dari Gas Alam dengan Menggunakan Absorber

Selama ini, proses penghilangan CO₂ dari gas alam di industri dilakukan dengan cara absorpsi menggunakan absorben larutan amina. Proses penghilangan gas CO₂ dari gas alam pada industri gas dan petrokimia dikenal juga dengan istilah *sweetening gas*, Pelarut yang banyak digunakan untuk menyerap gas CO₂ pada proses tersebut biasanya menggunakan larutan amina seperti MEA dan DEA. Selama terjadi kontak antara larutan amina dengan gas CO₂ akan timbul reaksi yang mengikuti persamaan sebagai berikut:



Gambar 2.2 memperlihatkan bagaimana unit penghilangan gas CO₂ dari gas alam yang selama ini sering digunakan di industri gas dan petrokimia. Proses pemisahan gas CO₂ terjadi di kolom absorpsi seperti pada gambar tersebut, dimana gas alam mengalir dari bagian bawah kolom, sementara larutan amina yang bertindak sebagai absorben mengalir melalui bagian atas kolom. Terjadi kontak antara gas dan larutan amina di dalam kolom yang memungkinkan berpindahannya gas CO₂ dari gas alam ke larutan amina. Selanjutnya larutan amina yang telah menyerap gas CO₂ ini akan keluar melalui bagian bawah kolom, dan

dikirim ke kolom regenerasi untuk melepaskan gas CO₂ yang terikat. Pada kolom inilah yang sering terjadi masalah bila antara kecepatan aliran gas dan kecepatan aliran larutan amina tidak bersesuaian yaitu terjadinya banjir, *unloading* dan *foaming*. Proses kontak gas-cair melalui kontaktor membran serat berlubang dapat diaplikasikan pada proses seperti pada Gambar 2.2 untuk menggantikan kolom absorber pada proses tersebut.



Gambar 2.2 Prinsip Proses Pemisahan Gas CO₂ dengan Menggunakan Pelarut Amina
(Sumber: Erik, 2007)

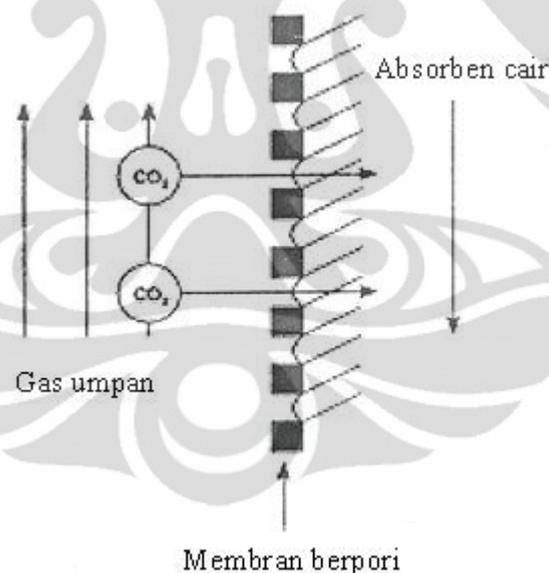
Senyawa amina yang telah menyerap gas asam terutama CO₂ menjadi bersifat korosif yang dapat merusak kolom absorber yang digunakan sebagai peralatan kontak gas-cair. Selain itu senyawa ini tentu saja juga berbahaya bila langsung dibuang ke lingkungan. Senyawa DEA misalnya, sangat berbahaya jika terminum atau terhisap melalui pernafasan, dan bersifat iritasi untuk kulit, mata dan sistem pernafasan. Oleh karena itu diperlukan jenis absorben lain yang berasal dari bahan alami, terutama dari tumbuh-tumbuhan, karena pada umumnya tidak berbahaya untuk lingkungan maupun tubuh manusia.

2.3.2 Absorpsi Gas CO₂ dari Gas Alam dengan Menggunakan Kontaktor Membran

Membran telah menjadi teknologi yang ditetapkan untuk penghilangan karbon dioksida (CO₂) sejak digunakan pertama kali dalam aplikasi pada tahun

1981. Pada awal penggunaannya prosesnya lambat dan terbatas pada aliran kecil, terutama karena adanya risiko ekonomi yang dihadapi dalam perlakuan terhadap aliran besar, tetapi juga karena banyak parameter proses desain yang belum diketahui (Dortmundt dan Doshi, 1999).

Absorpsi CO₂ dengan menggunakan membran didasarkan atas terjadinya kontak gas-cair melalui membran mikroporous yang hidrofobik. Membran ini membentuk penghalang yang *permeable* antara fasa gas dan fasa cair sehingga perpindahan massa yang terjadi tidak disertai dengan dispersi antara satu fasa dengan fasa yang lainnya. Dinding dari membran hidrofobik berfungsi untuk memisahkan fasa gas dan fasa cair namun komponen gas akan berdifusi melalui pori membran dan terabsorpsi ke dalam fasa cair. Ilustrasi absorpsi CO₂ oleh membran dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Absorpsi CO₂ oleh Suatu Larutan Melewati Membran
(Sumber: Feron dan Jansen, 2002)

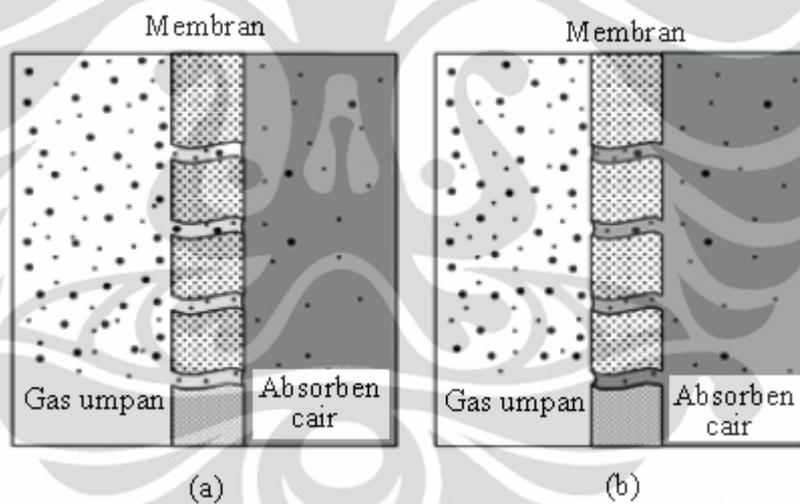
Perpindahan massa pada proses absorpsi CO₂ ini dipengaruhi oleh:

1. Difusi CO₂ dari fasa gas ke permukaan membran.
2. Difusi CO₂ melewati pori membran ke permukaan cairan/pelarut.
3. Pelarutan CO₂ ke dalam absorben diikuti dengan difusi dari larutan ataupun reaksi kimia.

2.3.2.1 Membran polipropilen

Saat ini sistem pemisahan gas menggunakan membran sudah banyak dikembangkan dalam skala laboratorium maupun industri. Kontaktor membran untuk pemisahan CO₂ menjadi alternatif pemisahan yang memberikan kelebihan dibandingkan teknologi kontaktor gas-cair konvensional. Kelebihannya antara lain fleksibilitas, modularitas, tingkat perpindahan massa yang tinggi dan kemudahan untuk *scale-up* (Rahmawati dkk, 2009).

Namun, permasalahan pembasahan pori membran oleh cairan pelarut menjadi penghambat komersialisasi teknologi ini. Pembasahan terjadi apabila cairan mengisi pori-pori membran, dan menyebabkan meningkatnya hambatan perpindahan massa membran secara signifikan seperti terlihat pada Gambar 2.4.



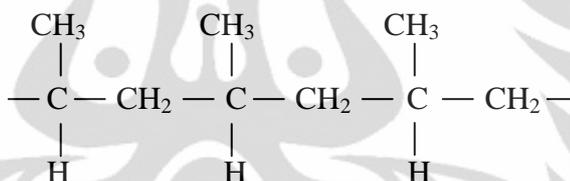
Gambar 2.4 Pembasahan Kontaktor Membran: (a) Tidak Terjadi Pembasahan; (b) Terjadi Pembasahan (Sumber: Dindore et al, 2004).

Kecenderungan pembasahan dari kombinasi pelarut dan membran ditentukan oleh properti membran (ukuran pori), properti cairan (tegangan permukaan), dan interaksi keduanya (sudut kontak). Berdasarkan IUPAC, ukuran pori membran dapat dibagi menjadi 3 jenis, yaitu:

1. Mikropori : ukuran pori membran < 2 nm
2. Mesopori : ukuran pori membran antara 2 – 50 nm
3. Makropori : ukuran membran > 50 nm

Cairan dengan tegangan permukaan rendah cenderung membasahi permukaan membran dibanding pelarut yang memiliki tegangan permukaan lebih tinggi (Dindore et al, 2004). Oleh karena itu, teknologi kontakor membran umumnya memanfaatkan membran hidrofobik seperti polipropilene (PP), politetrafluoroetilene (PTFE), dan polivinildenefluorid (PVDF) sebagai media pengontak antara fasa gas dan fasa cair tanpa mendispersikan salah satu fasa ke fasa lainnya.

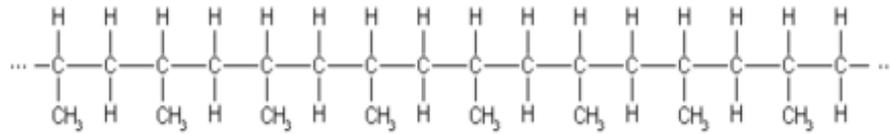
Pada penelitian kali ini membran yang digunakan adalah membran sintetik yang terbuat dari salah satu jenis polimer, yaitu polipropilen. Digunakan karena berdasarkan sifat hidrofobik yang dimilikinya, air tidak bisa membasahi membran secara spontan. Polipropilen memiliki titik leleh yang cukup tinggi, yaitu 160 °C (320 °F), yang menyebabkannya memiliki stabilitas termal yang baik. Struktur molekul polipropilen dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Struktur Molekul Polipropilen

(Sumber: www.wikipedia.org)

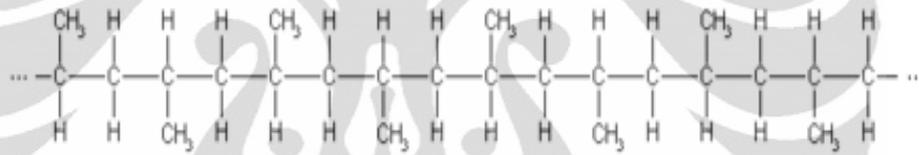
Polipropilen merupakan salah satu dari banyak jenis vinyl polimer, contoh lain dari vinyl polimer adalah polietilen, poli vinil klorida dan sebagainya. Sebagian besar vinyl polimer dibentuk melalui polimerisasi radikal bebas, akan tetapi pada polipropilen, polimerisasi yang dilakukan ialah polimerisasi Ziegler-Natta. Hal ini dikarenakan pada polimerisasi radikal bebas, jenis polimer yang akan terbentuk adalah polipropilen ataktik, sedangkan dengan menggunakan polimerisasi Ziegler - Natta akan dihasilkan polipropilen isotaktik. Sebagian besar polimer komersial yang beredar di pasaran merupakan polimer isotaktik seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Struktur Molekul Polipropilen Isotaktik

(Sumber: www.wikipedia.org)

Polipropilen ataktik, seperti yang terlihat pada Gambar 2.7, merupakan jenis polimer yang tergolong lemah karena polimer yang terbentuk merupakan bentuk amorf dengan susunan rantai yang tidak beraturan. Lain halnya dengan polipropilen isotaktik yang memiliki susunan rantai teratur, yaitu semua cabang metil terdapat pada sisi rantai yang sama. Polipropilen isotaktik, memiliki karakteristik yang kuat dikarenakan memiliki bentuk kristal.



Gambar 2.7. Struktur Molekul Polipropilen Ataktik

(Sumber: www.wikipedia.org)

Sifat-sifat dari polipropilen isotaktik diantaranya:

1. Memiliki densitas 0,9 gr/cm³
2. Mempunyai *softening point* yang lebih tinggi dan dapat dipakai pada suhu tinggi.
3. Terhindar dari proses *cracking* oleh lingkungan, kecuali jika terdapat sulfur dan asam kromat.
4. Memiliki tingkat kekuatan yang tinggi.

2.3.2.2 Kontaktor membran serat berlubang

Konfigurasi modul membran yang sering digunakan di industri kimia terutama di unit pemisahannya ialah modul *spiral wound*, *plate and frame*, *tubular* dan *hollow fiber*. Modul membran *hollow fiber* (serat berlubang) seperti terlihat pada Gambar 2.8, telah secara luas digunakan sebagai peralatan kontak

dan absorpsi karena memberikan rasio antara luas permukaan kontak dan volume peralatan yang besar.



Gambar 2.8 Kontaktor Membran Serat Berlubang

(Sumber: K. Sirkar, 2008)

Sebagai kontaktor gas-cair, modul membran ini memiliki gaya penggerak perbedaan konsentrasi untuk terjadinya perpindahan massa dari fasa gas ke fasa cair atau sebaliknya. Ini berbeda dengan sistem membran konvensional seperti mikrofiltrasi, ultrafiltrasi dan osmosa balik yang gaya penggerak adalah perbedaan tekanan. Dengan demikian pada kontaktor membran gas - cair hanya diperlukan sedikit perbedaan tekanan antara fasa cair dan fasa gas untuk menjaga agar interfasa gas - cair tetap berada pada pori - pori membran (Dindore dkk., 2005). Perbedaan konsentrasi gas di antara fasa gas dan fasa cair memberikan gaya penggerak untuk perpindahan secara difusi melalui membran tersebut.

Dalam banyak proses membran, pemilihan membran didasarkan pada ukuran pori dari materialnya. Akan tetapi untuk absorpsi dan penghilangan gas dengan atau dari cairan di dalam kontaktor membran gas - cair parameter sifat ini kurang memadai. Interaksi gas dan cairan merupakan parameter yang penting dalam proses kontak sehingga hidrofobisitas dari material membran perlu diketahui pula. Kontaktor membran serat berlubang telah diverifikasi oleh beberapa peneliti dalam rentang aplikasi yang luas seperti dalam absorpsi atau

penghilangan gas ke atau dari cairan. Pada membran hidrofobik berpori mikro, pori membran terisi oleh gas sehingga tahanan perpindahan massa di membran dapat diabaikan terhadap tahanan perpindahan massa keseluruhan di dalam kontaktor (Mavroudi dkk, 2006).

Pemilihan cairan absorben yang dapat digunakan untuk menyerap gas CO₂ melalui kontaktor berbasis membran harus didasarkan pada beberapa kriteria yaitu (Li dan Chen, 2005):

1. Mempunyai reaktivitas yang tinggi dengan CO₂

Jika kontak, CO₂ akan bereaksi dengan cairan di pori membran. Reaktivitas yang tinggi akan meningkatkan laju penyerapan dan fluks massa. Tahanan perpindahan massa di fasa cair dapat diturunkan dengan adanya reaksi kimia (Gabelman dan Hwang, 1999).

2. Tegangan permukaan

Karena membran yang digunakan untuk menyerap gas CO₂ biasanya hidrofobik, maka cairan dengan tegangan permukaan yang rendah mempunyai kecenderungan yang lebih besar untuk memasuki pori membran. Idealnya cairan tidak membasahi membran, sehingga pori membran masih terisi oleh gas walaupun pada tekanan cairan yang tinggi. Tahanan perpindahan massa pada membran yang tidak terbasahi relatif lebih kecil daripada tahanan perpindahan massa di fasa cair. Sebaliknya membran yang basah oleh cairan pelarut memiliki tahanan perpindahan massa dari lapisan cairan yang *stagnan* pada pori membran jauh lebih besar dan menjadi sangat dominan pada laju perpindahan massa keseluruhan (Kreulen dkk., 1993).

3. Kesesuaian kimia dengan material membran

Pembasahan membran dapat disebabkan oleh reaksi antara pelarut kimia dengan membran yang mengakibatkan berubahnya morfologi permukaan/pori membran. Kesesuaian kimia merupakan faktor yang penting dalam menentukan stabilitas modul membran (Wang dkk., 2004).

4. Memiliki tekanan uap rendah dan kestabilan termal yang baik

Untuk reaksi yang irreversibel seperti CO₂ dan NaOH kenaikan suhu akan menaikkan absorpsi kimia. Akan tetapi bila pelarut mudah menguap, uapnya akan mengisi pori membran dan bahkan dapat menembus membran ke arah

fasa gas dan ini akan meningkatkan tahanan perpindahan massa total (Kim dan Yang, 2000). Oleh karenanya pelarut dengan tekanan uap rendah sangat disukai. Pelarut juga harus memiliki kestabilan suhu yang baik dan secara kimia stabil pada daerah suhu yang besar, sehingga degradasi termal dapat dihindari.

5. Mudah diregenerasi

Faktor ini juga harus dipertimbangkan jika absorben harus dikirim kembali ke dalam proses. Hal ini juga menentukan efisiensi absorpsi karena menentukan biaya operasi.

Pada kolom absorpsi antara laju alir gas dan laju alir cairan saling bergantung satu sama lainnya sehingga akan terjadi masalah dalam prosesnya bila kedua laju alir fluida tadi tidak bersetujuan. Aliran gas biasanya mengalir melalui bagian bawah kolom absorpsi, sementara aliran cairan akan mengalir melalui bagian atas kolom. Apabila aliran gas terlalu besar maka akan timbul masalah terikutnya cairan ke dalam aliran gas yang keluar dari bagian atas kolom (*entrainment*), atau bahkan bisa menyebabkan banjir (*flooding*) jika cairan yang terbawa sangat besar. Sebaliknya, bila aliran gas terlalu rendah maka akan terjadi efek *unloading* dimana aliran gas ini akan sangat sulit sekali untuk naik ke atas dan keluar kolom. Selain itu karena adanya kontak langsung antara gas dan cairan juga memungkinkan terbentuknya busa (*foaming formation*) yang akan menurunkan luas permukaan kontak secara drastis yang pada akhirnya juga menurunkan kapasitas penyerapannya. Masalah tersebut di atas tidak akan terjadi bila prosesnya dilakukan di dalam kontaktor membran karena fasa gas dan fasa cairnya tidak bercampur selama terjadinya proses kontak.

2.3.2.3 Studi Perpindahan Massa pada Kontaktor Membran Serat Berlubang

Pada penelitian ini digunakan kontaktor membran serat berlubang, dengan konsentrasi CO₂ antara fasa gas dan cair sebagai gaya pendorong terjadinya perpindahan CO₂ melewati membran.

Dimana K merupakan koefisien perpindahan massa keseluruhan yang dihasilkan dari 3 buah koefisien perpindahan massa individual yaitu pada saat CO₂ menuju permukaan membran, tahanan membran, dan dari permukaan

membran menuju cairan. Jumlah ketiga tahanan ini merupakan tahanan keseluruhan untuk perpindahan gas di dalam sistem kontaktor membran yang berhubungan dengan koefisien perpindahan massa seperti persamaan berikut:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{H k_G} + \frac{1}{H k_m} + \frac{1}{k_L} \quad (2.2)$$

Dengan K adalah koefisien perpindahan massa total (m/s), H adalah bilangan Henry, k_G adalah koefisien perpindahan massa fasa gas (m/s), k_m adalah koefisien perpindahan massa yang melewati membran (m/s), dan k_L adalah koefisien perpindahan massa fasa cair (m/s).

Aliran fasa gas yang digunakan merupakan gas campuran CO_2 dan CH_4 sehingga terdapat lapisan batas pada gas. Namun perpindahan gas melalui membran dengan cara difusi melalui fasa gas jauh lebih besar dibandingkan dengan cara difusi melalui fasa cair, hal tersebut menyebabkan konsentrasi lapisan batas dapat diabaikan. Karena membran yang digunakan adalah membran hidrofobik maka pori-pori membran akan terisi gas, sehingga tahanan membran untuk perpindahan gas juga dapat diabaikan. Karena pengaruh $1/Hk_G$ dan $1/Hk_m$ terhadap proses perpindahan massa kecil, maka hanya tahanan pada cairan yang akan memiliki pengaruh yang paling besar, sehingga persamaan (2.2) dapat disederhanakan menjadi:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_L} \quad (2.3)$$

Prinsip metode yang digunakan untuk mengetahui perpindahan massa yang terjadi pada proses absorpsi gas - cair adalah dengan mengamati perbedaan konsentrasi di dalam kontaktor. Koefisien perpindahan massa yang terjadi dihitung melalui persamaan sebagai berikut:

$$k_L = \frac{Q_L}{A_m} \ln \frac{C^* - C_0}{C^* - C_1} \quad (2.4)$$

Dengan k_L adalah koefisien perpindahan massa (m/s), Q_L adalah laju alir volumetrik pelarut (L/jam), A_m adalah luas kontak perpindahan massa (m^2), C^* adalah kelarutan CO_2 di dalam pelarut, C_0 adalah konsentrasi gas CO_2 sebelum melewati modul dan C_1 adalah konsentrasi gas CO_2 setelah melewati modul.

Koefisien perpindahan massa umumnya dinyatakan dalam bentuk korelasi perpindahan massa. Dalam aliran kontakror membran, bentuk korelasi perpindahan massa ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$Sh = a Re^b Sc^c \quad (2.5)$$

Dengan Sh adalah bilangan Sherwood, Re adalah bilangan Reynold (Re) dan Sc bilangan Schmidt. Berikut ini persamaan ketiga bilangan tak berdimensi tersebut:

$$Sh = k \frac{d_e}{D} \quad (2.6)$$

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

$$Re = \frac{\rho v d_e}{\mu} \quad (2.7)$$

Dengan Re adalah bilangan Reynold, ρ adalah massa jenis dari pelarut (kg/m^3), v adalah kecepatan aliran (m/s), d_e adalah diameter ekuivalen (m), dan μ adalah viskositas dari pelarut (kg/ms).

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (2.8)$$

Dengan Sc adalah bilangan Schmidt, ν adalah viskositas kinematik (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).

$$\epsilon = 1 - n_{\text{fiber}} \left(\frac{d_{o, \text{fiber}}}{D_{i, \text{modul}}} \right)^2 \quad (2.9)$$

Dengan $d_{o, \text{fiber}}$ adalah diameter serat (m), $D_{i, \text{modul}}$ adalah diameter selongsong modul (m), dan n_{fiber} 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 $d_{o, \text{fiber}}$ dan $d_{\text{ekuivalen}}$. Diameter ekuivalen ini dihitung dari persamaan:

$$d_e = \frac{d_{o, \text{fiber}}}{\sqrt{1-\epsilon}} \quad (2.10)$$

Dengan d_e adalah diameter ekuivalen (m), $d_{o, \text{fiber}}$ adalah diameter serat (m), dan ε adalah faktor kekosongan di dalam modul.

2.3.2.4 Studi Hidrodinamika pada Kontaktor Membran Serat Berlubang

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 (*pressure drop*) dan bilangan Reynold.

Pada fluida yang mengalir melalui saluran yang terisi penuh, gaya-gaya yang paling berpengaruh adalah gaya inersia dan gaya viskositas. Perbandingan antara gaya inersia dengan gaya viskositas ini disebut dengan bilangan Reynold. Studi ini mempelajari karakteristik dan hubungan antara bilangan Reynold terhadap faktor friksi (f) dan *pressure drop* (ΔP).

$$Re = \frac{\rho v d_e}{\mu} \quad (2.7)$$

Dengan Re adalah bilangan Reynold, ρ adalah massa jenis dari pelarut (kg/m^3), v adalah kecepatan aliran (m/s), d_e adalah diameter ekuivalen (m), dan μ adalah viskositas dari pelarut (kg/ms).

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:

$$f = \frac{\varepsilon (D_o^2 - D_f^2) \Delta P}{4 d_o L_f \frac{1}{2} \rho v^2} = \frac{d_e \Delta P}{2 L_f \rho v^2} \quad (2.11)$$

Dengan ΔP adalah perbedaan tekanan (Pa), d_e adalah diameter ekuivalen (m), L_f adalah panjang modul membran (m), ρ adalah densitas fluida (kg/m^3) dan v adalah kecepatan aliran (m/s).

Menurut literatur (Bird et al, 2002), faktor friksi untuk aliran laminar ($Re < 2.100$) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (2.12)$$

Sedangkan untuk aliran turbulen ($2.100 < Re < 100.000$), persamaan faktor friksi yang berlaku adalah:

$$f = \frac{0,0791}{Re^{1/4}} \quad (2.13)$$

2.4 Penelitian Sebelumnya

Pada Tabel 2.4 diperlihatkan hasil penelitian mengenai absorpsi gas CO₂ dengan menggunakan larutan penyerap yang berasal dari tanaman mengkudu, yang telah dilakukan sebelumnya.

Tabel 2.4 Hasil Penelitian Sebelumnya

No.	Judul Penelitian	Koefisien perpindahan massa pada dosis 100 gr pelarut/L air	Koefisien perpindahan massa dengan pelarut air sebagai pembanding	Korelasi perpindahan massa CO ₂ oleh pelarut
1.	Pemanfaatan Pelarut Alam dari Buah Mengkudu (<i>Morinda Citrifolia</i>) untuk Absorpsi Gas CO ₂ Menggunakan Kontaktor Membran Serat Berlubang	$4,52 \times 10^{-5}$ m/s	$4,26 \times 10^{-5}$ m/s	$Sh = 0,704 \phi^{-0,61} Re^{0,51}$
2.	Pemanfaatan Pelarut Bahan Alam dari Daun Mengkudu (<i>Morinda Citrifolia</i>) dalam Absorpsi CO ₂ Melalui Kontaktor Membran Serat Berlubang	$2,58 \times 10^{-5}$ m/s	$4,25 \times 10^{-5}$ m/s	$Sh = 0,714 \phi^{-0,59} \cdot Re^{0,50}$

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Pendahuluan

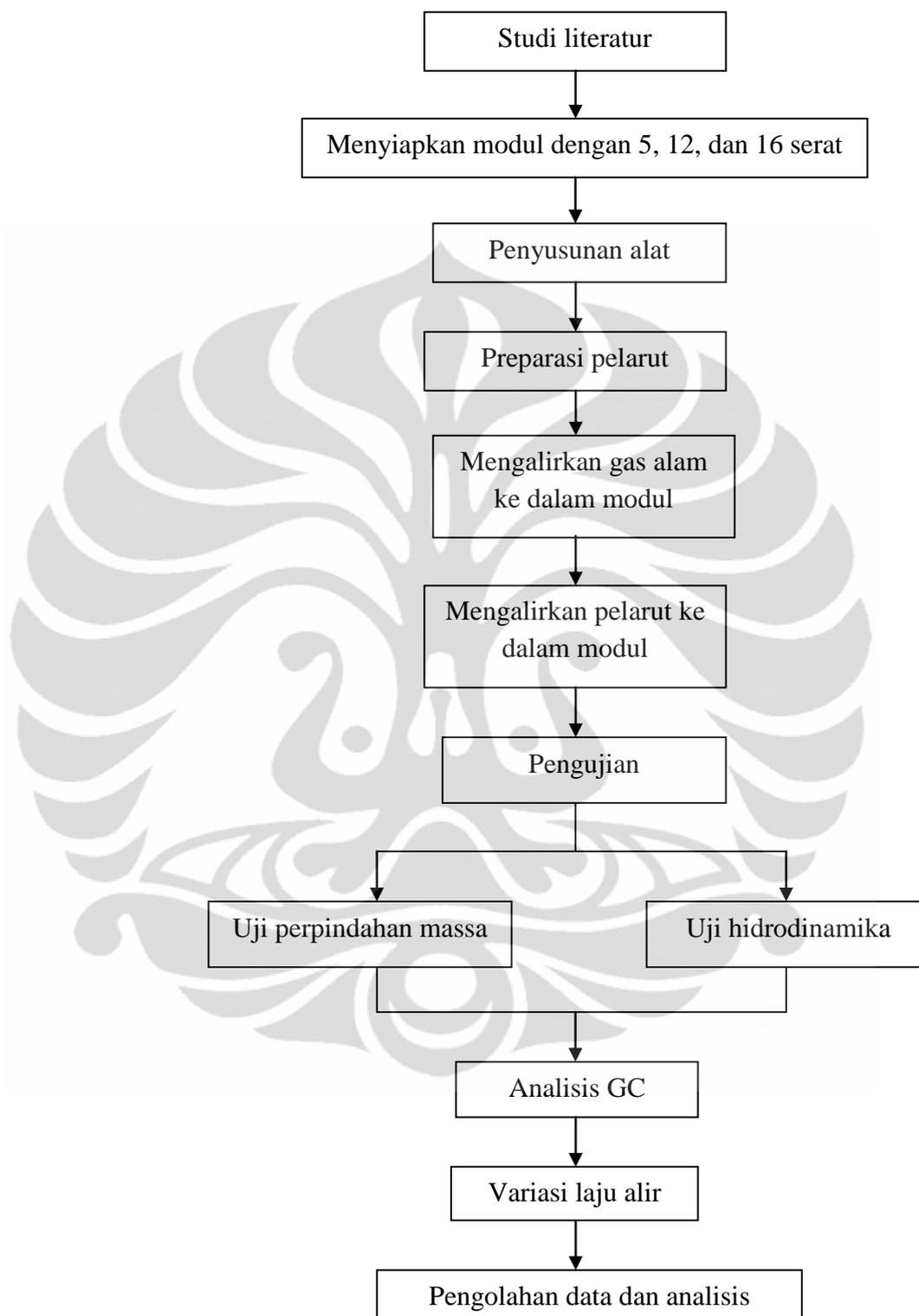
Penelitian yang dilakukan secara garis besar adalah mengamati proses perpindahan gas CO₂ dari aliran gas ke aliran cair yaitu larutan yang berasal dari buah mengkudu di dalam kontaktor membran serat berlubang. Dari penelitian ini ingin diketahui mengenai potensi buah mengkudu sebagai pelarut untuk memisahkan gas CO₂ dari gas alam melalui kontaktor membran serat berlubang, juga mempelajari mengenai perpindahan massa dan hidrodinamikanya.

Penelitian ini dilakukan dengan cara melewatkan gas alam yang berupa campuran dari gas CH₄ dan CO₂ ke dalam kontaktor membran serat berlubang. Proses absorpsi gas CO₂ dilakukan dengan memvariasikan laju alir pelarut dan jumlah serat pada membran tersebut. Hal ini untuk mengetahui pengaruh laju alir pelarut dan jumlah serat pada membran terhadap absorpsi gas CO₂ tersebut.

3.2 Diagram alir Penelitian

Secara keseluruhan, penelitian yang dilakukan meliputi: studi literatur, uji perpindahan massa dan hidrodinamika di dalam kontaktor membran serat berlubang serta analisis data dan pembuatan laporan hasil penelitian. Diagram alir penelitian yang dilakukan diperlihatkan pada Gambar 3.1.

Pada studi literatur, dikumpulkan literatur mengenai absorpsi gas melalui kontaktor membran serta merangkum semua penelitian yang telah dilakukan untuk tujuan tersebut khususnya mengenai absorpsi gas CO₂ dengan menggunakan pelarut tanaman mengkudu. Selain itu juga dikumpulkan informasi mengenai senyawa kimia yang terdapat di dalam tanaman mengkudu baik dari buku, jurnal maupun artikel. Dari hasil studi literatur ini diharapkan diperoleh data yang dapat digunakan sebagai pembandingan keberhasilan penelitian yang dilakukan terutama dalam hal perpindahan massa gas CO₂ ke dalam larutan yang berasal dari buah mengkudu, serta penurunan tekanan yang terjadi di dalam kontaktor membran serat berlubang.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Tahap selanjutnya adalah menyiapkan modul membran yang merupakan salah satu alat utama dalam penelitian ini. Modul ini digunakan sebagai kontaktor

antara gas campuran CO₂ dan CH₄ dengan pelarut. Larutan yang akan digunakan adalah larutan dari buah mengkudu. Ada 3 buah kontaktor membran yang digunakan pada penelitian ini yang memiliki jumlah serat yang berbeda-beda yaitu 5, 12, dan 16 serat. Diameter kontaktor adalah sama untuk ketiganya yaitu 1,6 cm dengan panjang 47 cm. Membran serat berlubang yang digunakan dalam penelitian ini adalah yang bersifat hidrofobik karena senyawa yang diharapkan berpindah melalui membran tersebut adalah gas CO₂.

Langkah selanjutnya adalah menyiapkan peralatan-peralatan pendukung seperti tangki reservoir pelarut, pompa air, tabung gas campuran CO₂ dan CH₄, *mass flowmeter*, *liquid flowmeter*, *needle valve*, dan menghubungkannya sehingga menjadi satu sistem secara keseluruhan. Setelah itu dilakukan preparasi atau persiapan pelarut. Pelarut yang digunakan adalah berasal dari buah mengkudu dengan dosis 100 gram buah mengkudu per liter air. Berikut ini langkah-langkah dalam preparasi pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*).

1. Memilih buah mengkudu yang masih mentah (berwarna hijau, mengkal, bertekstur keras).
2. Menimbang buah mengkudu dan membersihkannya.
3. Memotong buah mengkudu menjadi beberapa bagian.
4. Memasukkan buah mengkudu ke dalam *juicer* agar didapatkan sarinya.
5. Menyaring sari buah mengkudu dengan kain saring 200 mesh.
6. Melarutkan sari buah mengkudu dengan air.
7. Menampung pelarut di dalam reservoir pelarut.

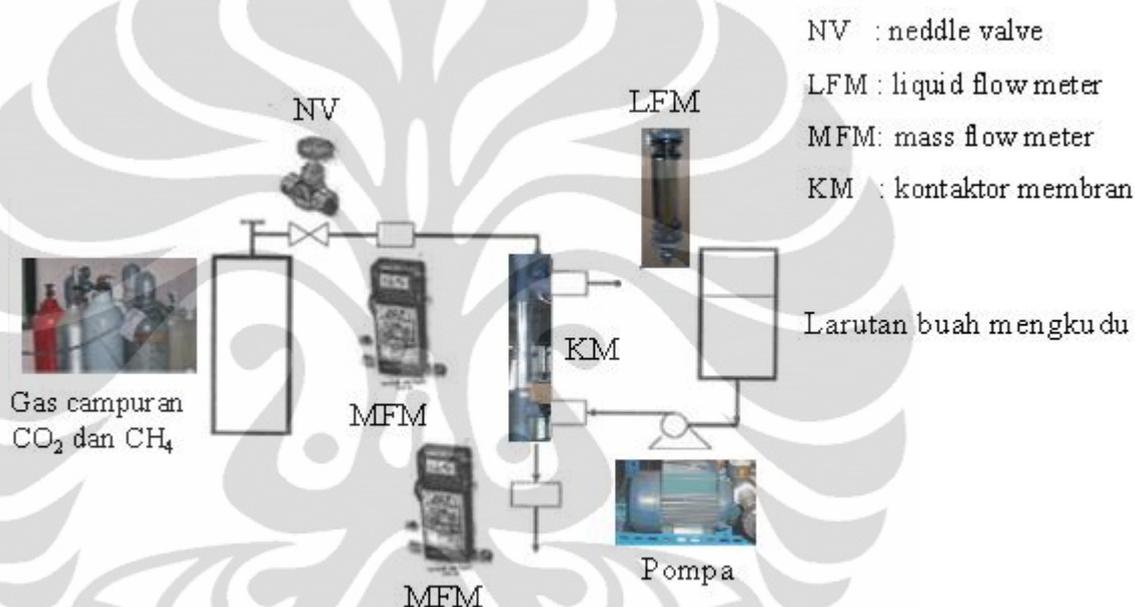
Tahap selanjutnya adalah mengalirkan gas CO₂ dengan laju alir gas sebesar 150 sccm dan menunggu hingga *steady*. Kemudian pelarut dialirkan dengan memanfaatkan pompa dan laju alirnya diatur dengan menggunakan *liquid flowmeter*. Setelah kondisi *steady* pengambilan sampel dilakukan untuk variasi laju alir 350, 400, 450, 500, 550, dan 600 liter/jam

Data pengamatan yang diambil adalah waktu yang dibutuhkan gas CO₂ per 15 ml pada *bubble flowmeter* yang menunjukkan nilai laju alir Gas CO₂ yang tidak terserap ke dalam pelarut, pH dan temperatur awal pelarut sebelum melewati modul membran serta pH dan temperatur akhir pelarut sesudah melewati modul serta perubahan tekanan sebelum dan sesudah melewati modul.

Langkah selanjutnya adalah mengolah data dan menganalisis untuk mendapatkan nilai koefisien perpindahan massa dan korelasinya serta aspek hidrodinamika seperti faktor friksi.

3.3 Skema Alat

Skema rancangan alat yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut:



Gambar 3.2 Skema Alat Penelitian

Skema penelitian seperti pada Gambar 3.2 digunakan untuk mengukur kinerja perpindahan massa dan penurunan tekanan yang terjadi di dalam kontaktor. Aliran campuran gas CO₂ dan CH₄ akan dilewatkan melalui bagian dalam serat (*lumen fiber*) sementara aliran pelarutnya melalui bagian selongsong (*shell side*) dari kontaktor yang digunakan.

Selama penelitian, cairan dari bak penampung akan dipompa menuju kontaktor membran melalui bagian selongsong setelah terlebih dahulu melewati *flowmeter* untuk diatur kecepatannya. Sementara itu campuran gas CO₂ dan CH₄ dari tangki gas akan melewati *mass flowmeter* kemudian langsung dialirkan ke dalam kontaktor membran melalui bagian dalam serat lalu keluar kontaktor membran. Laju alir gas masuk akan diatur menggunakan kerangan jarum (*needle*

valve). Pada saat yang bersamaan akan diukur perbedaan tekanan antara cairan yang masuk ke kontaktor membran dan cairan yang keluar dari kontaktor membran. Pada saat cairan memasuki kontaktor membran, terjadi perpindahan gas CO₂ ke larutan di fasa cair melalui pori membran karena perbedaan konsentrasi di antara fasa gas dan fasa cair di dalam serat. Variabel operasi pada penelitian ini adalah laju alir pelarut buah mengkudu dan jumlah serat yang terdapat di dalam kontaktor membran.

Pada penelitian ini dilakukan 2 jenis analisis dengan menggunakan alat *Gas Chromatography* (GC). Analisis pertama adalah analisis kuantitatif dengan menggunakan sampel dari gas campuran CO₂ dan CH₄ setelah melewati kontaktor membran dengan menggunakan GC TCD. Hal ini dilakukan untuk mengetahui komposisi output gas campuran tersebut setelah terjadinya proses absorpsi CO₂ oleh larutan buah mengkudu. Analisis kedua adalah analisis kualitatif dengan menggunakan sampel awal sebelum absorpsi CO₂ dan sampel akhir setelah absorpsi CO₂ dengan menggunakan GC/MS. Hal ini dilakukan untuk mengetahui senyawa apa saja yang berpengaruh pada proses absorpsi CO₂.

3.4 Deskripsi Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Kontaktor membran serat berlubang
Material : Polipropilen
Diameter serat : 0,2 cm
Ukuran modul :
 - Diameter selongsong kontaktor membran : 1,6 cm
 - Panjang membran : 47 cm
 - Jumlah serat : 5, 12, dan 16 serat
2. Tangki reservoir pelarut sebagai tempat untuk pelarut buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) dengan volume 250 L.
3. Tabung gas campuran CO₂ dan CH₄ beserta regulatornya.
4. *Needle valve*, untuk mengontrol laju alir gas campuran CO₂ dan CH₄.
5. Pompa, digunakan untuk mengalirkan pelarut dari reservoir menuju modul membran dengan spesifikasi sebagai berikut:

Produksi : Pedrollo
 Jenis : Pompa sentrifugal

Spesifikasi

- Q : 5-40 L/min
- Qmax : 45 L/min
- Hmax : 42 m
- V : 220 V
- RPM : 2900 RPM
- kW : 0,1 kW

6. *Liquid flowmeter* untuk mengukur laju alir dari pelarut.

Produksi : Cole Parmer

Q : 100-1000 L/h

7. *Mass flowmeter*, untuk mengukur besarnya laju alir gas campuran CO₂ dan CH₄.

Produksi : mass – Trak

Q : 0 – 300 sccm

Kondisi STP: 21 °C / 1 atm

8. pH meter, untuk mengukur pH sampel.

Model : Portable meter, Orion

Tipe : 3-Star pH meter

9. Termometer, untuk mengukur temperatur sampel.

10. Manometer digital, untuk mengukur perbedaan tekanan pelarut sebelum dan sesudah melewati modul.

Tipe : Lutron PM-9100 HA

11. GC TCD, untuk mengetahui komposisi gas campuran CO₂ dan CH₄ setelah melewati kontaktor membran.

3.4.2 Bahan

Sedangkan bahan-bahan yang digunakan adalah:

1. Gas campuran, dengan kandungan gas CO₂ sebesar 31 % dan CH₄ sebesar 69 %, sebagai gas umpan yang akan diabsorpsi
2. Larutan buah mengkudu (*Morinda citrifolia*), sebagai absorben CO₂.

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian secara bertahap dilakukan melalui tahapan berikut ini:

1. Persiapan modul

Modul yang digunakan berbentuk *shell & tube* dengan sisi selongsong terbuat dari acrylic dan sisi tabung terbuat dari membran serat berlubang berbahan dasar polipropilen yang direkatkan dengan lem Araldite.

2. Menghubungkan peralatan berupa tabung gas campuran CO₂ dan CH₄, tangki reservoir pelarut, pompa air, *mass flowmeter*, *liquid flowmeter*, dan *needle valve* sehingga menjadi satu sistem secara keseluruhan.

3. Menyiapkan pelarut buah mengkudu

Tahapan dalam preparasi pelarut adalah menimbang buah mengkudu, mencuci buah mengkudu, memotong buah mengkudu menjadi beberapa bagian, memasukkannya ke dalam *juicer* sehingga didapatkan sarinya, dan melarutkan sari buah mengkudu dengan air.

4. Mengalirkan gas campuran CO₂ dan CH₄, menunggu hingga keadaan *steady*.

5. Mengalirkan pelarut dengan laju alir tertentu, menunggu hingga keadaan *steady*.

6. Melakukan pengambilan data:

a) Studi perpindahan massa

Data yang diambil adalah *t bubble flowmeter* serta pH dan temperatur sampel pelarut sebelum memasuki modul dan setelah memasuki modul.

a) Studi hidrodinamika

Data yang diambil adalah penurunan tekanan masukan dan keluaran pada modul membran yang tertera pada manometer digital pada setiap laju sirkulasi.

7. Melakukan pengambilan data untuk setiap variasi laju alir dan jumlah serat.

8. Melakukan analisis sampel gas campuran CO₂ dan CH₄ setelah melewati kontaktor membran dengan menggunakan GC TCD, dan analisis sampel awal sebelum absorpsi CO₂ serta sampel akhir setelah absorpsi CO₂ dengan menggunakan GC/MS..

3.6 Kondisi Operasi

Kondisi operasi yang dilakukan selama penelitian adalah:

1. Pengambilan sampel dilakukan setelah sistem berada dalam kondisi *steady*.
2. Variasi laju alir pelarut adalah 350 hingga 600 liter/jam dengan interval 50 liter/jam.
3. Jumlah serat membran dalam modul yang digunakan adalah 5, 12, dan 16 serat.
4. Tekanan gas alam yang digunakan adalah atmosferik (1 atm).
5. Pengambilan data berupa *t bubble flowmeter*, pH dan temperatur awal sampel, pH dan temperatur akhir sampel dan perbedaan tekanan sebelum dan setelah melewati modul.

3.7 Pengolahan Data

Data-data yang diambil dalam penelitian akan diolah untuk menentukan koefisien perpindahan massa antara pelarut buah mengkudu dengan gas CO₂ dan melihat korelasi perpindahan massa dari kontaktor membran serat berlubang. Selain itu juga untuk melihat aspek hidrodinamika pelarut di dalam membran.

3.7.1 Tabel Data Pengamatan

A. Uji Perpindahan Massa

Jumlah serat =

Laju alir gas campuran CO₂ dan CH₄ input =

Laju alir (L/jam)	Kondisi Awal		Kondisi akhir		<i>t bubble flowmeter</i> (s)
	pH	T (°C)	pH	T (°C)	
350					
400					
450					
500					
550					
600					

B. Uji Hidrodinamika

Jumlah serat =

Laju alir (L/jam)	Beda tekanan		
	Data 1	Data 2	Data 2
350			
400			
450			
500			
550			
600			

3.7.2 Koefisien Perpindahan Massa

Dari data hasil pengukuran, dapat dihitung koefisien perpindahan massa gas CO₂ ke dalam pelarut buah mengkudu selama penelitian seperti pada persamaan berikut:

$$k_L = \frac{Q_L}{A_m} \ln \frac{C^* - C_o}{C^* - C_1} \quad (2.4)$$

dimana:

k_L = koefisien perpindahan massa (m/s)

Q_L = laju alir volumetrik pelarut (L/jam)

A_m = luas kontak perpindahan massa (m²)

C^* = kelarutan CO₂ di dalam pelarut

C_o = konsentrasi gas CO₂ sebelum melewati modul.

C_1 = konsentrasi gas CO₂ setelah melewati modul.

C^* dapat dihitung melalui persamaan:

$$C^* = 3,59 \times 10^{-7} R T \exp\left(\frac{2044}{T}\right) \quad (3.1)$$

dimana:

R = konstanta gas (0,00825 L atm/mol K)

T = temperatur (K).

Dan untuk menghitung konsentrasi dari fluida sebelum dan setelah melewati modul dapat menggunakan persamaan berikut yang merupakan fungsi dari pH:

$$\text{pH} = -\log(\text{H}^+) \quad (3.2)$$

Luas kontak perpindahan massa pada modul membran dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$A_m = n_f \cdot \pi \cdot d_f \cdot l \quad (3.3)$$

dimana:

A_m = luas kontak perpindahan massa (m^2)

n_f = jumlah fiber/serat di dalam modul membran

d_f = diameter fiber/serat (m)

l = panjang modul membran (m)

3.7.3 Korelasi Perpindahan Massa

Dari data yang diperoleh selama penelitian kemudian akan dibuat korelasi perpindahan massa sebagai fungsi karakteristik aliran cairan yang terjadi di dalam kontaktor membran serat berlubang yang diwakili oleh hubungan antara bilangan Sherwood (Sh), bilangan Reynold (Re) dan bilangan Schmidt (Sc). Bilangan Sherwood (Sh) mewakili koefisien perpindahan massa tak berdimensi, dan bilangan Reynold (Re) mewakili karakteristik aliran, serta bilangan Schmidt (Sc) mewakili fungsi viskositas.

$$Sh = k \frac{d_e}{D} \quad (2.6)$$

dimana:

Sh = bilangan Sherwood

k = koefisien perpindahan massa (m/s)

d_e = diameter ekivalen kontaktor (m)

D = difusivitas pelarut (m^2/s)

$$Re = \frac{\rho v d_e}{\mu} \quad (2.7)$$

dimana:

Re = bilangan Reynold

ρ = massa jenis dari pelarut (kg/m^3)

v = kecepatan aliran (m/s)

d_e = diameter ekivalen kontaktor (m)

μ = viskositas dari pelarut (kg/ms)

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (2.8)$$

dimana:

Sc = bilangan Schmidt

ν = viskositas kinematik (m²/s)

D = difusivitas pelarut (m²/s)

Ketiga besaran tak berdimensi tersebut lalu dihubungkan dalam suatu persamaan berikut:

$$Sh = a Re^b Sc^c \quad (2.5)$$

Persamaan (2.5) adalah persamaan untuk menunjukkan hubungan koefisien perpindahan massa terhadap jenis aliran pada modul baik berupa aliran laminar, transisi maupun turbulen.

3.7.4 Studi Hidrodinamika

Dari data penurunan tekanan yang terjadi akan dibuat korelasinya dengan kecepatan aliran dan juga karakteristik alirannya. Faktor friksi aliran di dalam kontaktor juga dapat dihitung dengan menggunakan data penurunan tekanan sebagai berikut:

$$f = \frac{d_e \Delta P}{4 L_f \frac{1}{2} \rho v^2} \quad (2.11)$$

Dimana:

f : friksi

d_e : diameter ekuivalen (m)

L_f : panjang modul membran (m)

ΔP : penurunan tekanan cairan (Pa)

ρ : massa jenis pelarut (kg/m³)

v : kecepatan linier pelarut (m/s)

Faktor friksi yang diperoleh akan dibandingkan dengan faktor friksi dari literatur untuk aliran fluida melalui pipa halus dengan persamaan sebagai berikut:

$$f_{ratio} = \frac{f_{modul}}{f_{literatur}} \quad (3.4)$$

dimana:

f_{modul} = nilai friksi modul yang diperoleh dengan menghitung nilai friksi pada tiap laju sirkulasi yang dilakukan.

$f_{\text{literatur}}$ = nilai friksi literatur diperoleh pada laju alir yang digunakan pada penelitian.

f_{ratio} = rasio friksi diperoleh dari perbandingan antara nilai friksi modul hasil percobaan dengan nilai friksi literatur.



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas perpindahan massa CO₂ dari campurannya dengan CH₄ ke dalam pelarut yang berasal dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) di dalam kontaktor membran serat berlubang. Hal ini dapat diketahui 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*). Sedangkan studi hidrodinamika digunakan untuk melihat pengaruh jenis aliran terhadap efektivitas kinerja dari membran dengan cara melihat pengaruh faktor friksi yang ditimbulkan oleh aliran fluida terhadap kemampuan pelarut untuk mengabsorpsi CO₂. Faktor friksi ini berhubungan langsung dengan bilangan Reynold yang menunjukkan jenis aliran yang terjadi apakah laminar, atau turbulen. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Intensifikasi Proses, Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia.

4.2 Studi Perpindahan Massa

Studi perpindahan massa dilakukan dengan menggunakan kontaktor membran serat berlubang dan dengan pelarut yang berasal dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) dengan dosis 100 gr/L. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari senyawa - senyawa di dalam buah mengkudu (*Morinda Citrifolia*) terhadap proses absorpsi CO₂. Variasi jumlah serat yang terdapat di dalam kontaktor yang digunakan adalah 5, 12, dan 16 serat. Selama penelitian, laju alir pelarut divariasikan dari 350 L/jam hingga 600 L/jam, dengan interval 50 L/jam. Dengan mengolah data perubahan nilai pH larutan sebelum masuk ke dalam kontaktor membran dan nilai pH larutan setelah melewati kontaktor membran dapat dihitung koefisien perpindahan massa (k_L), yang dapat dijadikan tolak ukur

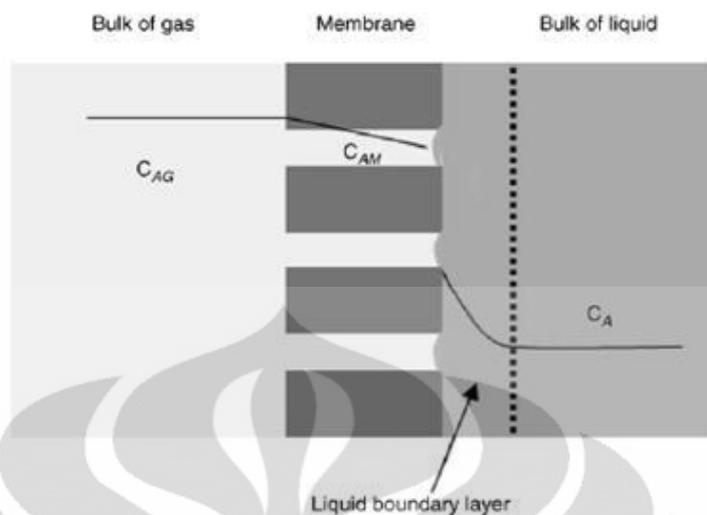
efektivitas proses absorpsi oleh pelarut yang berasal dari buah mengkudu (*Morinda citrifolia*) sesuai dengan persamaan (2.4).

$$k_L = \frac{Q_1}{A_m} \ln \frac{C^* - C_0}{C^* - C_1} \quad (2.4)$$

Koefisien perpindahan massa merupakan besaran yang dapat memperlihatkan studi perpindahan massa pada proses absorpsi CO₂. Sedangkan korelasi perpindahan massa digunakan untuk mengetahui hubungan antara kecepatan dan jenis aliran yang melewati kontaktor terhadap koefisien perpindahan massa yang dipengaruhi oleh geometri membran. Korelasi ini ditunjukkan oleh bilangan tidak berdimensi, yaitu bilangan Sherwood, *Sh*, yang merupakan fungsi dari bilangan Reynolds. Bilangan Sherwood ini secara tidak langsung menghubungkan peristiwa hidrodinamika yang terjadi di dalam kontaktor dengan proses perpindahan massa yang terjadi pada proses absorpsi CO₂.

4.2.1 Proses Absorpsi

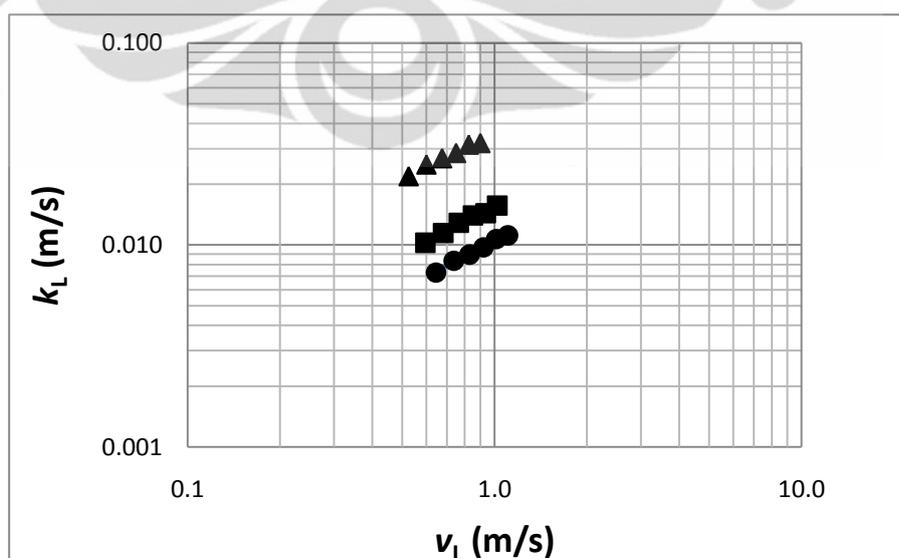
Gaya penggerak dari absorpsi kimia pada pelarut dari buah mengkudu (*Morinda Citrifolia*) merupakan perbedaan konsentrasi gas pada aliran pelarut. Proses perpindahan massa yang terjadi di dalam kontaktor dapat diilustrasikan dengan profil konsentrasi CO₂ pada membran. Profil konsentrasi ini dapat dilihat pada Gambar 4.1. Gambar ini menunjukkan bahwa konsentrasi pada bulk gas menuju membran awalnya tinggi, namun karena terdapat tahanan membran maka konsentrasi CO₂ akan menurun. Menurunnya konsentrasi CO₂ ini disebabkan CO₂ harus melewati pori-pori membran. Selanjutnya setelah memasuki bulk fasa cair konsentrasi CO₂ akan kembali menurun yang disebabkan adanya lapisan film fasa cair.



Gambar 4.1 Skema Perpindahan Massa CO_2 dari Fasa Gas ke Fasa Cair
(Sumber: Zhang et al., 2008)

4.2.2 Pengaruh Laju Alir Pelarut

Variasi laju alir pelarut juga sangat menentukan perubahan efektivitas proses perpindahan massa yang terjadi. Hal ini berkaitan dengan dinamika fluida di dalam kontaktor 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.



Gambar 4.2 Variasi koefisien perpindahan massa, k_L , untuk kontaktor dengan jumlah serat 5 (▲), 12 (■) dan 16 buah (●), terhadap kecepatan linier cairan, v_L .

Gambar 4.2 diperoleh dari hasil pengolahan data percobaan yang dapat dilihat pada Lampiran 3. Pada Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa dengan semakin meningkatnya kecepatan linier yang diakibatkan karena peningkatan laju alir akan meningkatkan koefisien perpindahan massa yang didapat. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi laju alir akan dapat mempercepat proses absorpsi yang terjadi.

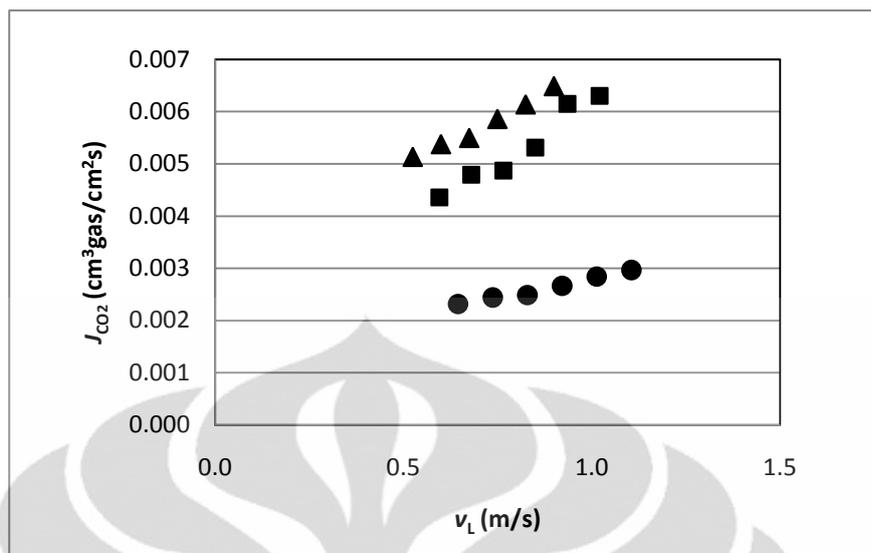
Hal ini disebabkan gas CO₂ dapat berdifusi dengan cepat melalui pori membran. Peningkatan koefisien perpindahan massa dipengaruhi secara langsung oleh fraksi kekosongan dan distribusi pelarut di dalam kontaktor. Dengan semakin meningkatnya kecepatan aliran pelarut maka fraksi kekosongan di dalam kontaktor akan terpenuhi oleh pelarut sehingga pada kondisi ini distribusi pelarut akan menjadi semakin merata dan kemampuan absorpsi menjadi meningkat dan perpindahan massa akan semakin tinggi (Kartohardjono et al., 2009).

Selain itu, dengan semakin meningkatnya laju alir pelarut, maka akan dihasilkan penurunan hambatan dalam perpindahan massa pada fasa cairan. Hal tersebut dikarenakan dengan meningkatnya kecepatan pelarut akan menyebabkan sifat aliran semakin turbulen, sehingga proses perpindahan massa, yaitu difusi CO₂ ke dalam pelarut yang terjadi semakin besar akibat adanya arus Eddy pada aliran turbulen. Arus Eddy akan memperkecil hambatan yang terjadi di sekitar aliran dan memperbesar nilai koefisien perpindahan massa (Bird, 2002).

Untuk studi perpindahan massa, dapat juga dilihat melalui parameter fluks gas CO₂ melalui persamaan (4.1).

$$J_{CO_2} = \frac{Q_{gas\ input} - Q_{gas\ output}}{A_m} \quad (4.1)$$

Fluks gas CO₂ dapat didefinisikan sebagai banyaknya gas CO₂ yang berpindah persatuan waktu persatuan luas membran. Gambar 4.3 memperlihatkan hubungan antara fluks gas CO₂ yang diserap pelarut dengan kecepatan linier pelarut dari buah mengkudu (*Morinda Citrifolia*). Dari Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya kecepatan linier yang diakibatkan karena peningkatan laju alir, sama seperti koefisien perpindahan massa, akan meningkatkan juga nilai fluks gas CO₂ (J_{CO_2}).



Gambar 4.3 Variasi fluks perpindahan massa, J_{CO_2} , untuk kontaktor dengan jumlah serat 5 (▲), 12 (■) dan 16 buah (●), terhadap kecepatan linier, v_L .

4.2.3 Pengaruh Jumlah Serat

Tingkat keefektifan absorpsi CO_2 dengan menggunakan membran serat berlubang juga dianalisis berdasarkan variasi jumlah serat pada setiap kontaktor. Jumlah serat yang divariasikan yaitu 5, 12, dan 16 serat. Pengaruh variasi jumlah serat terhadap proses perpindahan massa dapat dilihat dari nilai koefisien perpindahan massa yang didapat. Dari Gambar 4.2 juga dapat dilihat nilai koefisien perpindahan massa pada variasi jumlah serat di dalam kontaktor yang berbeda pula. Gambar 4.2 memperlihatkan bahwa semakin besar jumlah serat maka nilai koefisien perpindahan massa yang didapat akan semakin kecil. Hal ini disebabkan karena adanya fraksi kekosongan di dalam kontaktor. Semakin banyak jumlah serat maka fraksi kekosongan di dalam kontaktor akan semakin rendah yang disebabkan oleh luas permukaan membran menjadi semakin besar. Dengan menurunnya fraksi kekosongan, maka zona mati (*dead zone*) akibat adanya proses *channeling* akan menjadi lebih banyak. Zona mati ini akan mengakibatkan area kontak antara fasa gas dengan fasa cair 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 kontaktor (Lipnizki dan Field, 2001). Semakin bertambahnya jumlah serat juga secara langsung dapat meningkatkan pembentukan lapisan film

pada membran. Lapisan film ini akan terbentuk pada lapisan antarmuka gas-cair membran yang dapat menghambat proses absorpsi. Akibatnya proses perpindahan massa CO₂ yang melewati lapisan film akan terhambat dan menyebabkan menurunnya nilai koefisien perpindahan massa (Kartohardjono dan Chen, 2005).

4.2.4 Jenis Absorpsi

Keefektifan pelarut yang digunakan, salah satunya dapat diketahui dari jenis absorpsi yang terjadi apakah absorpsi fisika atau kimia. Untuk mengetahuinya, dapat digunakan persamaan (4.2) yang dikemukakan oleh Qi dan Cussler (1985). Persamaan ini digunakan untuk mengindikasikan adanya faktor reaksi pada absorpsi CO₂ oleh pelarut yang berasal dari buah mengkudu (*Morinda Citrifolia*).

$$\frac{4.k.L}{d_f.v_L} > 1 \quad (4.2)$$

Dengan menggunakan pelarut yang berasal dari buah mengkudu (*Morinda Citrifolia*), nilai faktor tersebut yang diperoleh pada setiap laju alir dan jumlah serat berada pada rentang 9,48 hingga 39,26. Hal ini berarti absorpsi yang terjadi merupakan absorpsi kimia.

Koefisien perpindahan massa CO₂ dari campurannya dengan CH₄ (dengan perbandingan komposisi CO₂ 31 % dan CH₄ 69 %) ke dalam pelarut yang berasal dari buah mengkudu pada penelitian ini dapat mencapai 3,198 x 10⁻² m/s. Sedangkan jika menggunakan pelarut air hanya mencapai 1,23 x 10⁻⁷ m/s (Adi Darma, 2007). Hal ini membuktikan jika proses absorpsi yang berlangsung secara kimia (dengan pelarut yang berasal dari buah mengkudu) memiliki nilai koefisien perpindahan massa yang lebih besar daripada absorpsi fisika (dengan pelarut air). Namun, jika digunakan pelarut amine seperti DEA (diethanolamine), nilai koefisien perpindahan massa yang didapatkan lebih besar lagi, yaitu mencapai 1 m/s (Prasetio, 2009). Hal ini dikarenakan pada pelarut yang berasal dari buah mengkudu (*Morinda Citrifolia*), tidak semua senyawanya memiliki pengaruh secara aktif dalam mempercepat proses absorpsi, sehingga perlu dikembangkan lagi teknik preparasi yang lebih baik, sehingga kondisi pelarut yang digunakan lebih optimal.

4.3 Korelasi Perpindahan Massa

Hubungan antara koefisien perpindahan massa dengan pengaruh jenis aliran dapat digambarkan dengan korelasi bilangan Reynolds dan bilangan Sherwood. Korelasi perpindahan massa ditunjukkan dengan persamaan berikut:

$$Sh = a Re^b Sc^c \quad (2.5)$$

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

Untuk menentukan bilangan Sherwood digunakan persamaan (2.6) dimana data yang dibutuhkan adalah nilai koefisien perpindahan massa, nilai diameter ekuivalen dan difusivitas CO₂ – H₂O yang tergantung dari temperatur sebagai berikut:

$$Sh = k \frac{d_e}{D} \quad (2.6)$$

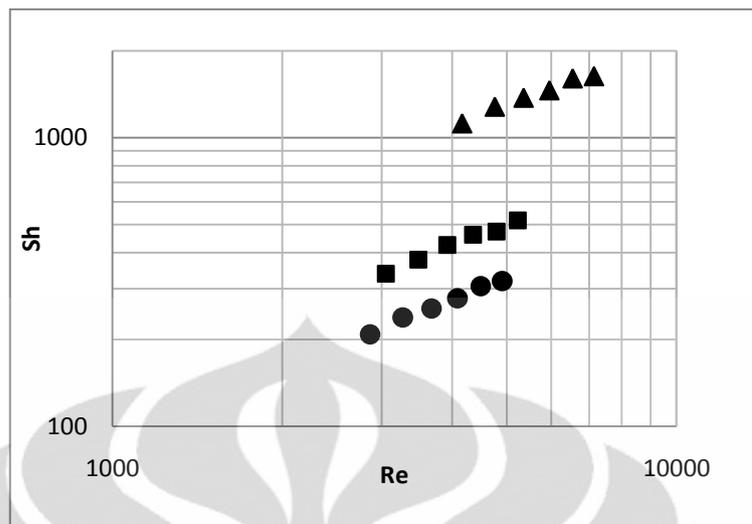
Gambar 4.4 memperlihatkan hubungan antara bilangan Sherwood dan bilangan Reynolds pada berbagai kontaktor dengan jumlah serat yang berbeda. Nilai pangkat atau orde yang diperoleh dari masing-masing persamaan dengan menggunakan *trendline power* pada Gambar 4.4, nilai rata-ratanya dari hasil penelitian adalah 0,754. Selanjutnya nilai ini akan dijadikan pangkat bagi bilangan Reynolds baru yang disebut dengan Re^b , dimana nilai Re^b ini akan dihubungkan kembali dengan bilangan Sherwood seperti diperlihatkan pada Gambar 4.5 untuk mengetahui pengaruh faktor geometri kontaktor terhadap koefisien perpindahan massa. Koefisien yang didapat dari persamaan garis lurus pada Gambar 4.5 akan dihubungkan dengan fraksi kepadatan membran. Bilangan Sherwood juga merupakan bilangan yang menunjukkan hubungan geometri kontaktor dengan aliran di dalam kontaktor. Hubungan tersebut dapat dilihat pada persamaan (4.3).

$$Sh = f(\varphi) Re^b \quad (4.3)$$

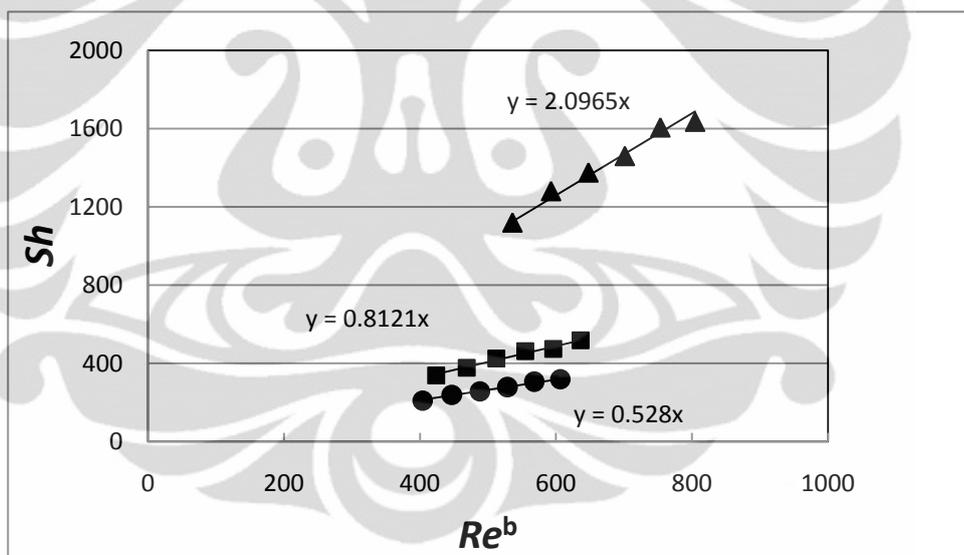
Jenis geometri membran ditunjukkan oleh besarnya fraksi kepadatan membran (φ) yang ditunjukkan oleh persamaan (4.4).

$$\varphi = n \left(\frac{d_f}{d_s} \right)^2 \quad (4.4)$$

Nilai koefisien (a) yang diperoleh dari persamaan garis pada Gambar 4.5 dapat dilihat pada Tabel 4.1.



Gambar 4.4 Variasi bilangan Sherwood, Sh , untuk kontaktor dengan jumlah serat 5 (\blacktriangle), 12 (\blacksquare) dan 16 buah (\bullet), terhadap bilangan Reynolds, Re .



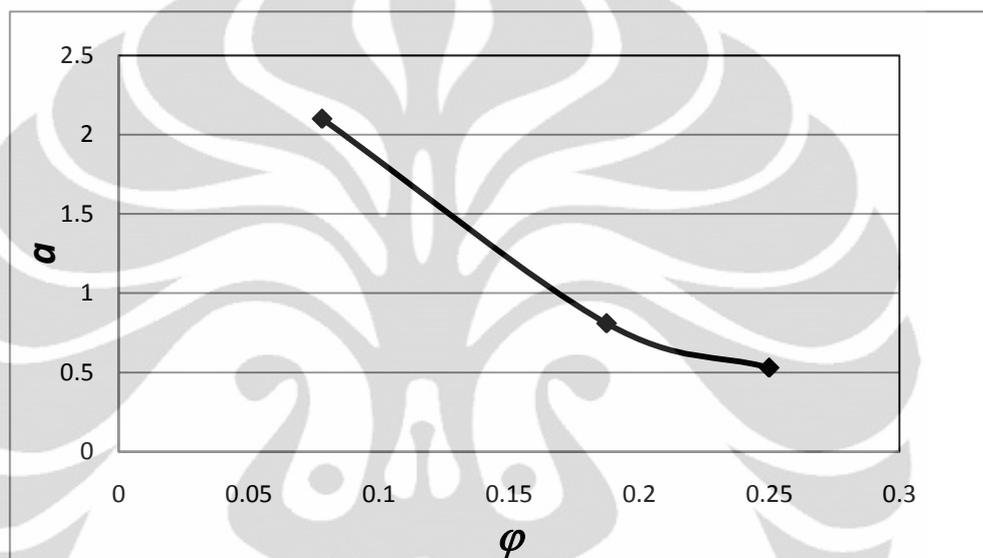
Gambar 4.5 Perbandingan bilangan Re^b terhadap bilangan Sherwood pada variasi laju alir dan jumlah serat.

Tabel 4.1 Koefisien dan Fraksi Kepadatan Membran untuk Setiap Kontaktor

n_f	Koefisien (a)	Fraksi kepadatan membran (φ)
5	2,096	0,08
12	0,812	0,19
16	0,528	0,25

Nilai koefisien ini selanjutnya dihubungkan dengan fraksi kepadatan membran seperti diperlihatkan pada Gambar 4.6 sehingga diperoleh persamaan yang selanjutnya digunakan untuk menghubungkan bilangan Reynolds dan bilangan Sherwood. Berdasarkan Gambar 4.6 hubungan antara fungsi geometri dengan fraksi kepadatan membran dapat ditulis sebagai:

$$f(\varphi) = 0,11\varphi^{-1,16} \quad (4.5)$$

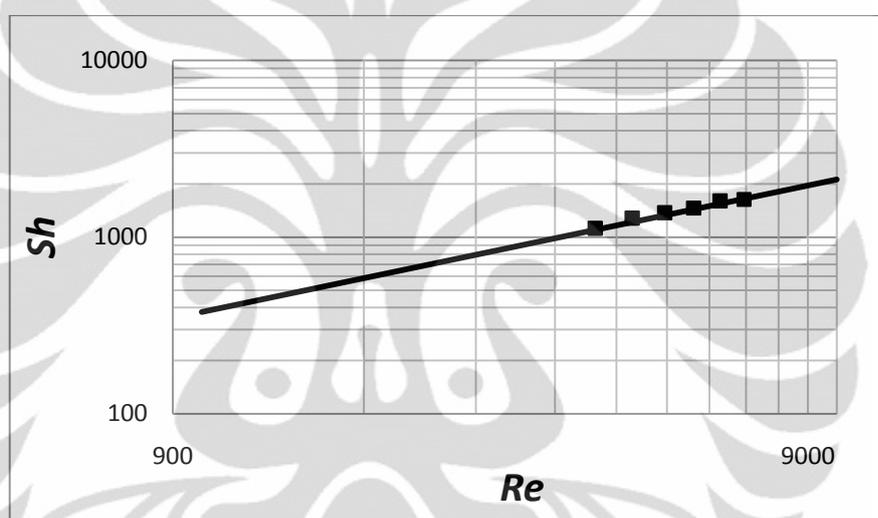


Gambar 4.6 Variasi Fungsi Geometri, A , Terhadap Fraksi Kepadatan Membran untuk Setiap Kontaktor, φ

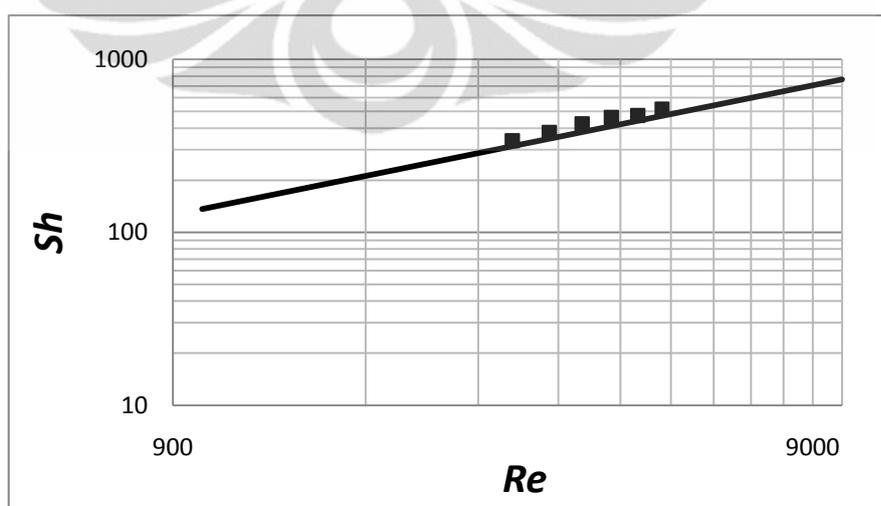
Persamaan yang didapatkan dari Gambar 4.6 dan Tabel 4.1 selanjutnya akan digunakan untuk menunjukkan hubungan antara geometris pada setiap kontaktor dengan jenis aliran di dalam kontaktor tersebut. Lalu dengan mensubstitusikan persamaan (4.5) ke persamaan (4.3) maka akan diperoleh persamaan (4.6) yang menghubungkan geometris membran terhadap aliran fluida di dalam kontaktor. Dari persamaan (4.6) juga terlihat bahwa eksponen dari bilangan Reynolds (b) lebih besar dari 0,5 sehingga dapat disimpulkan bahwa perpindahan massa yang terjadi di dalam kontaktor membran berada pada daerah turbulen (Costello et al., 1993).

$$Sh = 0,11 \varphi^{-1,16} Re^{0,754} \quad (4.6)$$

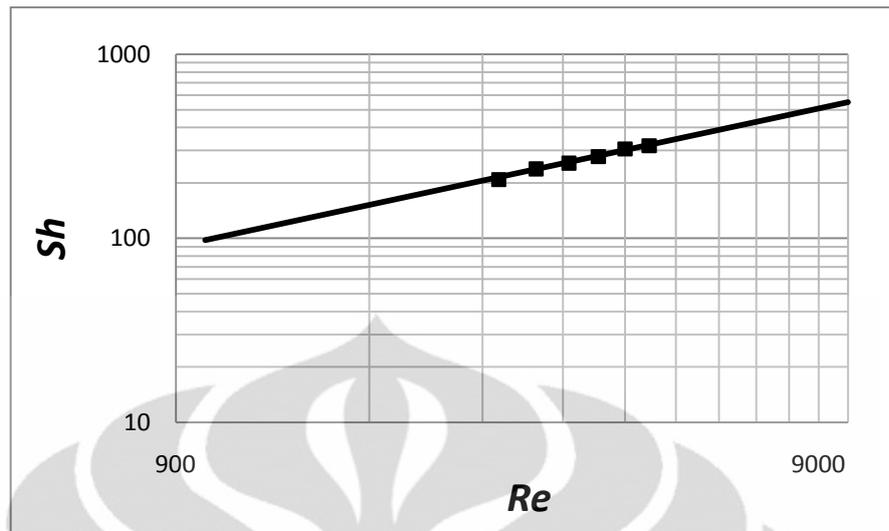
Gambar 4.7, 4.8 dan 4.9 memperlihatkan hubungan antara bilangan Sherwood baik yang berasal dari penelitian maupun dari persamaan (4.6) terhadap bilangan Reynolds pada kontaktor dengan jumlah serat 5, 12 dan 16 buah. Dari gambar-gambar tersebut terlihat bahwa disparitas nilai bilangan Sherwood dari hasil penelitian dan menggunakan persamaan (4.6) untuk daerah bilangan Reynolds yang diamati sangat kecil sehingga dapat disimpulkan bahwa persamaan (4.6) dapat digunakan untuk mengekspresikan bilangan Sherwood yang diperoleh dari penelitian.



Gambar 4.7 Variasi Bilangan Sherwood Hasil Penelitian (■) dan Model (Garis) Terhadap Bilangan Reynolds pada Kontaktor dengan Jumlah Serat 5 Buah



Gambar 4.8 Variasi Bilangan Sherwood Hasil Penelitian (■) dan Model (Garis) Terhadap Bilangan Reynolds pada Kontaktor dengan Jumlah Serat 12 Buah



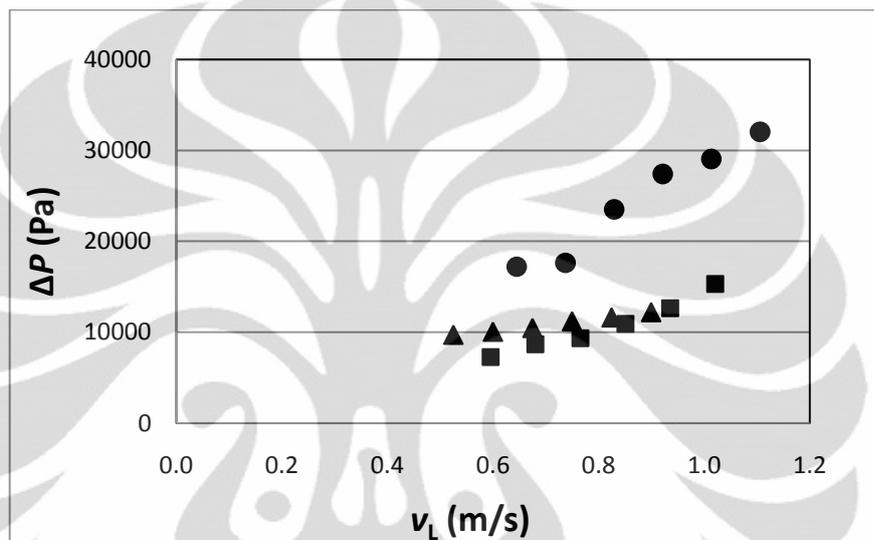
Gambar 4.9 Variasi Bilangan Sherwood Hasil Penelitian (■) dan Model (Garis) Terhadap Bilangan Reynolds pada Kontaktor dengan Jumlah Serat 16 Buah

4.4 Studi Hidrodinamika

Studi hidrodinamika dilakukan dengan pengambilan data perbedaan tekanan aliran pelarut sebelum dan setelah melewati kontaktor dengan variasi laju alir dan jumlah serat seperti pada studi perpindahan massa. Dari data tersebut dapat diketahui nilai friksi untuk ketiga kontaktor dengan jumlah serat yang berbeda, yaitu 5, 12, dan 16 serat. Tujuan dari pengujian hidrodinamika ini adalah untuk melihat faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja kontaktor membran terutama yang berhubungan dengan fluida yang bergerak, seperti penurunan tekanan di dalam kontaktor serta friksi atau gesekan yang ditimbulkan akibat gerak fluida terhadap dinding kontaktor ataupun dinding serat. Pergerakan dari fluida itu sendiri bergantung dari profil aliran fluida tersebut yang ditunjukkan oleh bilangan Reynolds.

Gambar 4.10 memperlihatkan hubungan antara penurunan tekanan cairan yang melewati kontaktor membran terhadap laju alirnya. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa kenaikan laju alir dapat meningkatkan penurunan tekanan yang terjadi di dalam kontaktor. Semakin tinggi kecepatan aliran di dalam kontaktor berarti jenis aliran tersebut makin ke arah turbulen dan kemungkinan terjadi friksi atau gesekan semakin besar sehingga mengakibatkan penurunan tekanan yang terjadi di dalam kontaktor semakin besar. Gambar 4.10 juga

memperlihatkan pengaruh variasi jumlah serat terhadap penurunan tekanan yang terjadi. Semakin banyak jumlah serat di dalam kontaktor maka friksi atau gesekan yang terjadi di dalam kontaktor akan semakin besar sebagai akibat dari semakin luasnya area kontak dinding terhadap fluida yang bergerak dan mengakibatkan penurunan tekanan yang terjadi semakin besar.

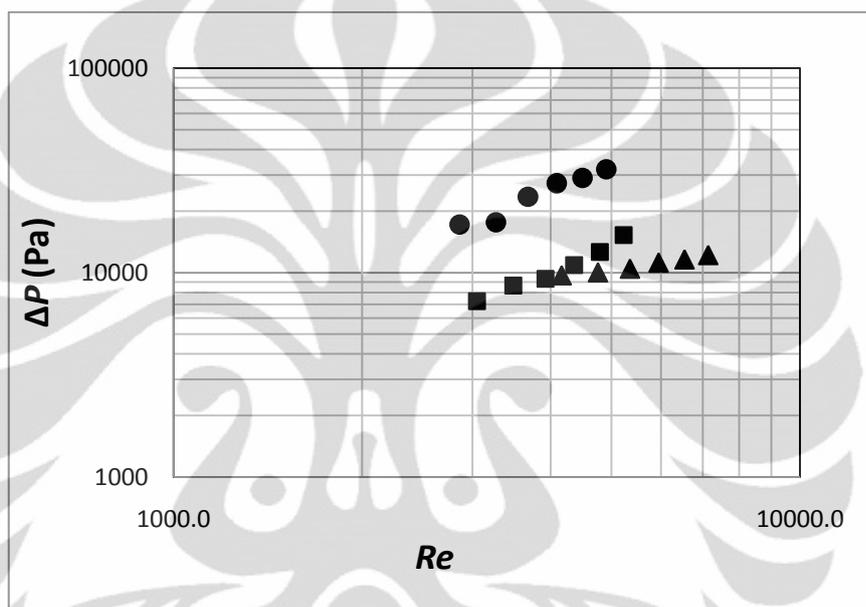


Gambar 4.10 Variasi Penurunan Tekanan Cairan yang Melewati Kontaktor Membran, ΔP , untuk Kontaktor dengan Jumlah Serat 5 (▲), 12 (■) dan 16 Buah (●), Terhadap Kecepatan Linier, V_L .

Gambar 4.11 memperlihatkan hubungan antara penurunan tekanan cairan yang melewati kontaktor dan bilangan Reynolds. Dari Gambar 4.11 dapat diketahui bahwa semakin tinggi bilangan Reynolds maka penurunan tekanan yang terjadi di dalam kontaktor pun akan semakin besar. Hal ini seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa kenaikan laju alir akan menaikkan bilangan Reynolds dan membuat kondisi aliran menjadi semakin turbulen sehingga semakin tinggi penurunan tekanan yang terjadi. 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:

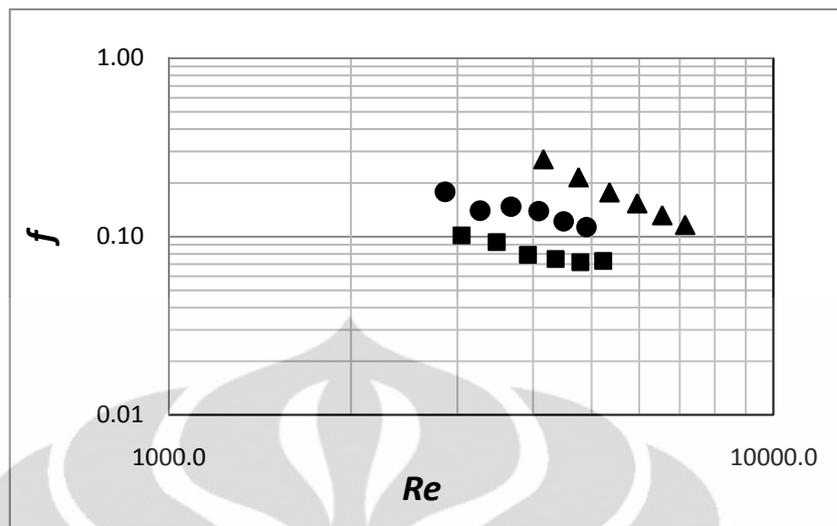
$$f = \frac{d_e \Delta P}{2 L_f \rho v^2} \quad (2.11)$$

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 kontaktor. Tetapi faktor friksi yang dihasilkan semakin rendah yang disebabkan faktor friksi merupakan besaran yang berbanding terbalik dengan gaya kinetik suatu fluida yang bergerak.



Gambar 4.11 Variasi Penurunan Tekanan Cairan yang Melewati Kontaktor Membran, ΔP , Untuk Kontaktor dengan Jumlah Serat 5 (▲), 12 (■) dan 16 Buah (●), Terhadap Bilangan Reynolds, Re .

Gambar 4.12 memperlihatkan hubungan antara faktor friksi dan bilangan Reynolds. Seluruh aliran yang terjadi pada penelitian ini berlangsung pada kondisi turbulen dan hubungan antara bilangan Reynolds dan faktor friksi adalah berbanding terbalik. Semakin tinggi bilangan Reynolds maka friksi yang dihasilkan akan semakin rendah. Gambar 4.12 juga menunjukkan pengaruh jumlah serat terhadap faktor friksi. Semakin banyak jumlah serat di dalam kontaktor maka faktor friksi yang dihasilkan akan semakin rendah. Hal ini disebabkan adanya pengaruh diameter ekuivalen yang berhubungan dengan *void fraction* (fraksi kekosongan). Semakin banyak jumlah serat maka fraksi kekosongan (ϵ) di dalam kontaktor akan semakin rendah dan mengakibatkan faktor friksi yang dihasilkan semakin rendah juga.

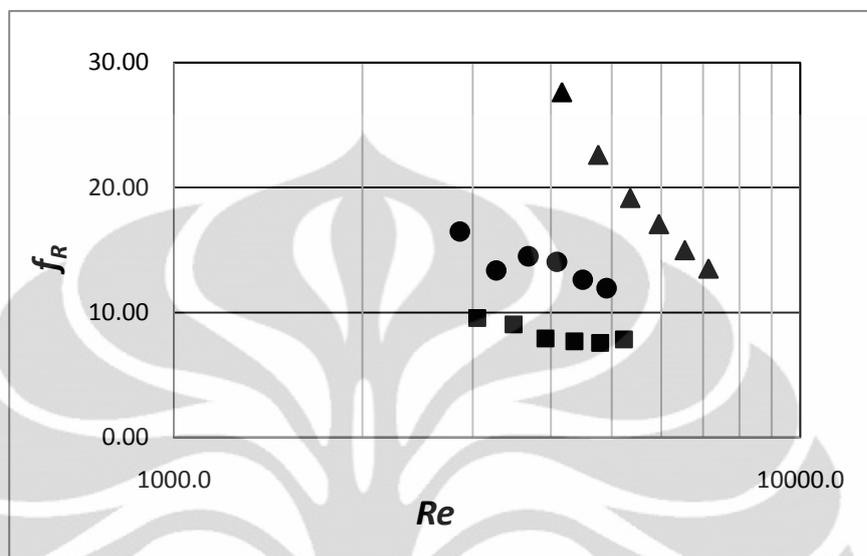


Gambar 4.12 Variasi Faktor Friksi, f , untuk Kontaktor dengan Jumlah Serat 5 (▲), 12 (■) dan 16 Buah (●), Terhadap Bilangan Reynolds, Re .

Selain faktor friksi dalam kontaktor, 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 kontaktor. Perbandingan antara friksi di dalam kontaktor dengan friksi literatur disebut rasio friksi. Hubungan antara bilangan Reynolds dengan rasio friksi dapat dilihat pada Gambar 4.13. Dari Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa dengan peningkatan bilangan Reynolds akan cenderung menurunkan rasio friksi. Penurunan rasio friksi pada aliran ini disebabkan oleh besarnya perubahan faktor friksi pada kontaktor lebih tinggi dibandingkan perubahan nilai friksi yang didapat pada perhitungan literatur yang hanya dipengaruhi oleh bilangan Reynolds saja.

Friksi yang terjadi selama penelitian (friksi kontaktor) nilainya lebih besar dibandingkan friksi yang seharusnya terjadi (friksi literatur, dimana fluida mengalir di dalam pipa yang halus) yang disebabkan nilai faktor friksi pada penelitian dipengaruhi oleh banyak faktor seperti tahanan pada membran, geometris membran, keberadaan zat-zat pengotor di dalam kontaktor, sambungan antara pipa dengan acrylic dan gesekan dengan permukaan membran (Ahmed et al., 2004). Seperti telah dibahas sebelumnya, meningkatnya friksi atau gesekan akan meningkatkan energi kinetik dan penurunan tekanan yang terjadi di dalam

kontaktor. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh rasio faktor friksi antara 7,6 hingga 27,6 seperti diperlihatkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Variasi Rasio Faktor Friksi, F , untuk Kontaktor dengan Jumlah Serat 5 (▲), 12 (■) dan 16 Buah (●), Terhadap Bilangan Reynolds, Re .

4.5 Analisis sampel

Untuk mengetahui komposisi gas CO_2 setelah melewati kontaktor membran sebagai hasil dari proses absorpsi, maka dilakukan analisis sampel gas output. Alat yang digunakan adalah GC TCD yang pengujiannya dilakukan di Laboratorium RPKA (Rekayasa Produk Kimia dan bahan Alam), Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia. GC TCD digunakan untuk mengetahui berapa komposisi CO_2 di dalam sampel gas output secara kuantitatif. Analisis sampel dilakukan dengan menggunakan gas input berupa gas campuran CO_2 dan CH_4 . Data sampel didapat pada penggunaan kontaktor dengan jumlah serat 16 buah dan laju alir 600 L/jam. Grafik dan data hasil analisis dengan menggunakan GC TCD dapat dilihat pada Lampiran 4.

Umpan gas yang digunakan dalam penelitian ini adalah campuran gas CO_2 dan CH_4 dengan komposisi 31 % CO_2 dan 69 % CH_4 . Dari data yang diperoleh dapat dilakukan perhitungan jumlah konsentrasi CO_2 yang terdapat pada sampel, yaitu sebesar 10,32 %. Jadi berdasarkan penelitian, umpan CO_2 dapat diturunkan komposisinya pada campuran gas dari 31 % ke 10,32 %.

Sementara itu untuk analisis senyawa kimia yang terdapat pada buah mengkudu sebelum dan sesudah absorpsi CO₂ secara kualitatif, digunakan alat GC/MS yang pengujiannya dilakukan di PUSLABFOR MABES POLRI, dengan hasil berupa grafik kromatogram dan data hasil analisis selengkapnya dalam bentuk tabel dapat dilihat pada Lampiran 5.

Dari analisis kimia tersebut memang belum dapat membuktikan bahwa absorpsi CO₂ oleh larutan mengkudu adalah absorpsi kimia seperti halnya yang diperoleh berdasarkan koefisien perpindahan massanya. Akan tetapi bila dilihat lebih detail lagi ada senyawa yang terdapat pada analisis kimia sebelum menyerap CO₂ yang tidak muncul lagi pada analisis kimia setelah menyerap CO₂, seperti:

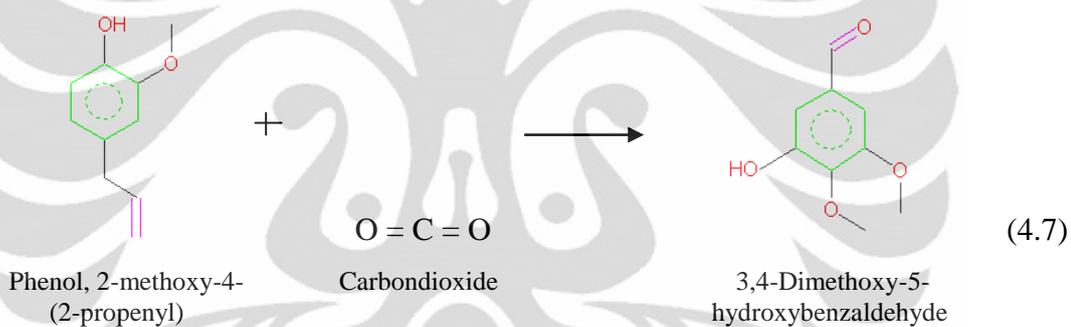
- 1 – methoxy – 1, 3 – cyclohexadiene
- Octanoic acid
- Benzeneacetonitrile
- Phenol, 2,6-dimethoxy
- 1H-Indole, 3-methyl
- Phenol, 2-methoxy-4-(2-propenyl)
- Hexadecanoic acid
- 1-(1,3-Dimethyl-2-butenyl)-4-methoxy-1,4-cyclohexadiene
- 8,11-Octadecadienoic acid, methyl ester
- 9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)
- 3-Methoxy-N-methylmorphinan
- 9-Octadecenamamide, (Z)
- Ergost-5-en-3-ol, (3.beta.)

Kemungkinan senyawa tersebut adalah senyawa yang bereaksi dengan gas CO₂ sehingga tidak muncul lagi pada analisis kimia setelah menyerap CO₂. Selain itu, terdapat senyawa yang baru muncul di analisis kimia setelah menyerap CO₂ sedangkan pada analisis kimia sebelum menyerap CO₂ tidak ada, seperti:

- 1H-Indole, 7-methyl
- 3-n-Pentyl-2-cyclohexen-1-one
- 1,4-Benzenediol, 2,6-dimethyl-
- 3,4-Diaminobenzoic acid
- 3,4-Dimethoxy-5-hydroxybenzaldehyde

- 2(1H)-Naphthalenone, octahydro-4a-methyl-7-(1-methylethyl)- (4a.alpha.,7.beta.,8a.beta.)
- 2(1H)-Naphthalenone, octahydro-4a-methyl-7-(1-methylethyl)- (4a.alpha.,7.beta.,8a.beta.)
- Z-11-Pentadecenol
- Bis(2-ethylhexyl) phthalate

Senyawa baru tersebut dapat diindikasikan sebagai hasil (produk) dari reaksi antara gas CO₂ dengan senyawa yang berasal dari buah mengkudu, walaupun masih harus dibuktikan lebih jauh lagi. Salah satu reaksi yang mungkin terjadi antara senyawa yang terdapat dalam buah mengkudu dan gas CO₂ diperlihatkan oleh persamaan (4.7).



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

- Koefisien dan fluks perpindahan massa meningkat dengan meningkatnya laju alir pelarut dan menurun dengan bertambahnya jumlah serat yang terdapat di dalam kontaktor membran.
- Korelasi perpindahan massa yang terjadi di dalam kontaktor membran dapat ditulis sebagai: $Sh = 0,11 \phi^{-1,16} Re^{0,754}$, yang juga mengindikasikan bahwa proses perpindahan massa terjadi pada daerah turbulen.
- Kenaikan laju alir pelarut dan jumlah serat akan menyebabkan meningkatnya penurunan tekanan di dalam kontaktor membran.
- Rasio faktor friksi kontaktor membran yang digunakan berada diantara 7,6 hingga 27,6.
- Berdasarkan penelitian, umpan gas campuran yang mengandung 31 % gas CO₂ dapat diturunkan konsentrasinya hingga 10,32 %.
- Jenis absorpsi gas CO₂ oleh larutan yang berasal dari buah mengkudu adalah absorpsi kimia.

5.2 Saran

- Pada penelitian yang telah dilakukan, pengukuran komposisi gas keluaran hanya dilakukan pada laju alir tertinggi dan kontaktor dengan jumlah serat tertinggi. Hal ini dilakukan karena terbatasnya alat yang dapat digunakan untuk pengukuran komposisi gas. Akan lebih baik lagi jika pengukuran komposisi gas keluaran tersebut dilakukan untuk setiap laju alir aliran dan setiap kontaktor membran yang digunakan.
- Dilakukan uji preparasi larutan penyerap yang akan digunakan terlebih dahulu, sehingga didapatkan kondisi optimal dengan cara memaksimalkan jumlah senyawa aktif yang dapat menyerap CO₂, dan meminimalkan jumlah senyawa yang dapat mengganggu proses penyerapan CO₂.

DAFTAR REFERENSI

- Adi Darma, Anggara. 2007. *Absorpsi CO₂ dari campurannya dengan CH₄ atau N₂ ke dalam air melalui kontaktor membran serat berlubang*. Universitas Indonesia: Depok
- Ahmed, T., M.J. Semmens, and M.A. Voss. 2004. *Oxygen transfer characteristics of hollow fiber, composite membranes*. *Advances in Environmental Research*, 8(3 - 4): p. 637 – 646
- Antara, N.T., H.G. Pohan, dan Subagja. 2001. *Pengaruh tingkat kematangan dan proses terhadap karakteristik sari buah mengkudu*. *Warta IHP/J. of Agro-Based Industry* 18(1-2): 25-31.
- Bangun, A. P. dan Sarworno, B. 2002. *Khasiat dan manfaat mengkudu*. Jakarta: Agromedia Pustaka
- Bird, R. Byron et al. 2002. *Transport phenomena*. 2nd edition. John Wiley & Sons: United States of America
- Costello, M. J., et al. 1993. *The effect of shell side hydrodynamics on the performance of axial flow hollow fiber modules*. *Journal of Membrane Science*. 80(1): p. 1 - 11
- Dindore, V.Y., D.W.F. Brillman, and G.F. Versteeg. *Hollow fiber membrane contactor as a gas – liquid model contactor*, *Chemical Engineering Science*, 60 (2), 467 – 479.
- Dindore, V.Y., D.W.F. Brillman, F.H. Guezebroek, G.F. Versteeg. *Membrane-solvent selection for CO₂ removal using membrane gas-liquid contactor*, *Separation Purification Technology*, 40 (2004), hal. 133 – 145.
- Djauhariya, Endjo dan Rosihan Rosman. 2004. *Status perkembangan teknologi tanaman mengkudu*. Balai Penelitian Tanaman Obat dan Aromatik.
- Dortmundt, David dan Kishore Doshi. *recent developments in CO₂ removal membran technology*, <http://www.uop.com>, (6 Juni 2010).
- Cooney, D.O. and C.C. Jackson. *Gas absorption in a hollow fibre device*, *Chemical Engineering Communication*, 61, (1987) pp. 159-167.

- Erik, Lars. 2007. *Aspen HYSYS Simulation of CO₂ Removal by amine absorption from a gas based power plant*. SIMS2007 Conference, Goteborg.
- Feron, Paul H.M., Albert E. Jansen. *CO₂ separation with polyolefin membrane contactors and dedicated absorption liquids: performance and prospects*. (Nederlands: Elsevier, Separation and purification technology 27, 2002), hal. 231-242
- Gabelman, A., and Hwang, S.T. 1999. *Hollow fiber membrane contactors*. Journal of Membrane Science, 159, 61 – 106
- Haikal Nur, Muhammad. 2009. *Pemanfaatan pelarut bahan alam dari daun mengkudu (Morinda citrifolia) dalam absorpsi CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga*. Universitas Indonesia: Depok
- Kartohardjono, S., et al., 2009. *Performance of Hollow Fiber Membrane gas – liquid contactors to absorb CO₂ using Deethanolamine (DEA) as a solvent*. Makara seri Teknologi. 13(2):p. 86 – 90.
- Kartohardjono, S and V. Chen. 2005. *Mass transfer and liquid hydrodynamics in sealed and hydrophobic hollow fiber membrane gas - liquid contactors*. Journal of Applied Membrane Science and Technology, 2: p. 1 - 11.
- Kim, Young – Seok dan Seung - Man Yang. 2000. *Absorption of carbondioxide through hollow fiber membrane using various aqueous absorbents*, Separation and Purification Technology, 21, 101 - 109
- Krestianto, Andri. 2009. *Pemanfaatan pelarut alam dari buah mengkudu (Morinda citrifolia) untuk absorpsi gas CO₂ menggunakan kontaktor membran serat berongga*. Universitas Indonesia: Depok.
- Kreuleun, H., Smolders, C.A., Versteeg, G.F., and van Swaaij, W.P.M., 1993. *Determination of mass transfer rates in wetted and non – wetted microporous membranes*, Chemical Engineering Science, 48 (11), 2093 – 2102.
- Kumar, P. S., 2002, *Development and design of membrane gas absorption processes, Ph.D. Thesis*, University of Twente, Netherlands.

- Kumoro, Andri Cahyo dan Hadiyanto. 2000. *Absorpsi gas karbondioksida dengan larutan soda api dalam kolom unggun tetap*. Forum Teknik Jilid 24, No.2
- K. Sirkar, Kamallesh. *Membranes, phase interfaces, and separations: novel techniques and membranes-an overview*. Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 47, No. 15, 2008
- Lendri, Sadjim. 2003. *Teknik pembibitan mengkudu pada berbagai media*. Buletin Teknik Pertanian Vol 8. Nomor 1
- Li, Jing Liang and Bing - Hun Chen. 2005. *Review of CO₂ absorption using chemical solvent in hollow fiber membran contactor*, Separation and Purification Technology, 41, 109 – 122
- Lipnizki, F and R.W Field. 2001. *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(2):p. 1 - 11
- Mavroudi, M., Kaldis, S.P., and Sakellaropoulos, G.P. 2006. *A study of mass transfer resistance in membrane gas-liquid contacting processes*. Jornal of Membrane Science, 272 (1-2), 103-115
- Meldon, J., 1999. *Simplify calculations chemical reactions*, Hydrocarbon Processing, 8, 87-91
- Mulder M., (1997), "*Basic principles of membrane technology*", Kluwer Academic Publishers.
- Nelson SC, 2001. *Noni cultivation in Hawaii*. Fruit Nuts 4:1-4
- Prasetio, Eko. 2009. *Performance of hollow fiber membrane gas-liquid contactors to absorb CO₂ using diethanolamine (DEA) as a solvent*. Universitas Indonesia: Depok
- Qi, Z and E.L Crussler. 1989. *Microporous hollow fibers for gas absorption: 1. Mass transfer in the liquid*. Journal of Membrane Science, 23(3): p. 321 - 332

Rahmawati, Yeni. I Gede Wenten dan Mubiar P. 2009. *Pengaruh pelarut terhadap swelling pada kontaktor membran untuk pemisahan CO₂ dari gas alam*. Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia.

Treybal, Robert E., 1981. *Mass transfer operation*, 3rd edition, p.281, Mc Graw-Hill International Book Company

Waha, Maria Goreti. 2001. *Sehat dengan mengkudu*

Wang, R., Li, D.F., Zhou, M. Liu, Liang, D.T. 2004. *Impact of DEA solutions with and without CO₂ loading on porous polypropylene membranes intended for use as contactors*, Journal of Membrane Science, 229, 147 – 157.

Wijanarko, Anondho dkk. *Tinjauan kelayakan ekonomi dan teknis perancangan awal pabrik pengolahan gas alam dengan umpan dari Lapangan Gas Senoro*. Jurnal Teknologi, Edisi No. 4. Tahun Xix

Winarti, Christina. *Peluang Pengembangan Minuman Fungsional dari Buah Mengkudu (Morinda citrifolia)*. Jurnal Litbang Pertanian, 24(4), 2005

www.wikipedia.org, polipropilen (7 Juni 2010)

Zhang, H.Y., et al. 2008. *Theoretical and experimental studies of membrane wetting in the membrane gas – liquid contacting process for CO₂ absorption*. Journal of Membrane Science. 308(1 - 2):p. 162 -170

LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Percobaan

1.1 Studi Perpindahan Massa

1.1.1 Data perpindahan massa untuk jumlah serat 16.

Laju alir gas CO₂ input = 150 sccm

Kondisi awal:

pH = 5,18

T (°C) = 28

Laju alir (L/jam)	Kondisi akhir		t bubble (s)	
	pH	T (°C)	Data 1	Data 2
350	5,11	28	6,60	6,80
400	5,11	28	6,82	6,94
450	5,13	28	6,95	6,95
500	5,14	28	7,06	7,40
550	5,14	28	7,54	7,52
600	5,16	28	7,59	7,94

1.1.2 Data perpindahan massa untuk jumlah serat 12.

Laju alir gas CO₂ input = 150 sccm

Kondisi awal:

pH = 5,21

T (°C) = 28,3

Laju alir (L/jam)	Kondisi akhir		t bubble (s)
	pH	T (°C)	
350	5,09	28,3	5,09
400	5,1	28,3	5,1
450	5,1	28,3	5,1
500	5,11	28,3	5,11
550	5,14	28,3	5,14
600	5,14	28,3	5,14

1.1.3 Data perpindahan massa untuk jumlah serat 5.

Laju alir gas CO₂ input = 150 sccm

Kondisi awal:

pH = 5,30

T (°C) = 28,3

Laju alir (L/jam)	Kondisi akhir		t bubble (s)	
	pH	T (°C)	Data 1	Data 2
350	5,14	28,3	5,75	5,74
400	5,14	28,3	5,84	5,81
450	5,16	28,3	5,88	5,85
500	5,18	28,3	5,94	6,04
550	5,18	28,3	6,08	6,1
600	5,21	28,3	6,26	6,18

1.2 Studi Hidrodinamika

1.2.1 Data hidrodinamika untuk jumlah serat 16.

Laju alir (L/jam)	Beda tekanan (in H ₂ O)		
	Data 1	Data 2	Data 3
350	82	81	81
400	84	82	83
450	107	107	106
500	124	122	121
550	130	129	128
600	141	141	141

1.2.2 Data hidrodinamika untuk jumlah serat 12.

Laju alir (L/jam)	Beda tekanan (in H ₂ O)		
	Data 1	Data 2	Data 3
350	37	37	37
400	42	43	43
450	46	45	45
500	51	52	52
550	58	59	59
600	66	71	71

1.2.3 Data hidrodinamika untuk jumlah serat 5.

Laju alir (L/jam)	Beda tekanan (in H ₂ O)		
	Data 1	Data 2	Data 3
350	27	27	27
400	29	28	28
450	30	30	30
500	33	33	33
550	35	35	34
600	37	37	37

Lampiran 2 Contoh Pengolahan Data

2.1 Pengolahan Data Koefisien Perpindahan Massa

Pengolahan data dilakukan untuk data perpindahan massa, dengan:

Jumlah serat = 16

Laju alir gas input (Q_L) = 350 L/jam

Pengolahan data kondisi aktual gas CO₂ input :

$$Q_2 = \frac{P_1}{P_2} \frac{T_2}{T_1} Q_1 = \frac{1 \text{ atm}}{1 \text{ atm}} \frac{28^\circ\text{C}}{21^\circ\text{C}} 150 \text{ sccm} = 200 \text{ accm} = 200 \frac{\text{ml}}{\text{menit}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} = 0,2 \text{ L/menit}$$

Pengolahan data luas penampang membran :

$$A_m = n_f \pi d_f l = 16 \times 3,14 \times 0,2 \text{ cm} \times 47 \text{ cm} = 472,256 \text{ cm}^2 \times \frac{1 \text{ m}^2}{10000 \text{ cm}^2} = 0,0472256 \text{ m}^2$$

$$Q_{\text{gas output}} = \frac{15 \text{ ml}}{\text{rata-rata } t_{\text{bubble}}} = \frac{15 \text{ ml}}{6,70 \text{ s}} = 2,2388 \frac{\text{ml}}{\text{s}} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ menit}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} = 0,1343$$

Pengolahan data konsentrasi:

$$C_0 = 0$$

$$C_1 = 10^{-\text{pH}} = 10^{-5,11} = 0,00000776$$

$$C^* = 3,59 \times 10^{-7} R T \exp\left(\frac{2044}{T}\right) = 3,59 \times 10^{-7} \times 0,08205 \times 301 \text{ K} \times \exp\left(\frac{2044}{301 \text{ K}}\right) = 0,007887$$

$$J_{\text{CO}_2} = \frac{Q_{\text{gas input}} - Q_{\text{gas output}}}{A_m} = \frac{\frac{3,33 \text{ cm}^3}{\text{s}} - \frac{2,2388 \text{ cm}^3}{\text{s}}}{0,0472256 \text{ m}^2} = 0,00232 \text{ m/s}$$

$$k_L = \frac{Q_L}{A_m} \ln \frac{C^* - C_0}{C^* - C_1} = \frac{350 \text{ L/jam}}{0,0472256 \text{ m}^2} \ln \frac{0,007887 - 0}{0,007887 - 0,00000776} \times \frac{1 \text{ dm}^3}{1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ dm}^3} = 0,00730 \text{ m/s}$$

2.2 Pengolahan Data Korelasi Perpindahan Massa

Pengolahan data bilangan Reynold dan bilangan Sherwood

Luas area penampang (A_{flow}) =

$$\frac{1}{4} \pi (d_s^2 - n d_f^2) = \frac{1}{4} \times 3,14 [(0,016 \text{ m})^2 - 16 (0,002 \text{ m})^2] = 0,00015072 \text{ m}^2$$

Laju alir linier pelarut (v_L) =

$$\frac{Q_L}{A_{\text{flow}}} = \frac{350 \text{ L/jam}}{0,00015072 \text{ m}^2} \times \frac{1 \text{ dm}^3}{1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ dm}^3} \times \frac{1 \text{ jam}}{3600 \text{ s}} = 0,6451 \text{ m/s}$$

$$\text{Faktor kekosongan } (\epsilon) = 1 - n_{\text{fiber}} \left(\frac{d_{o, \text{ fiber}}}{D_{i, \text{ modul}}}\right)^2 = 1 - 16 \left(\frac{0,002 \text{ m}}{0,016 \text{ m}}\right)^2 = 0,75$$

$$\text{Diameter ekuivalen } (d_e) = \frac{d_{o, \text{ fiber}}}{\sqrt{1-\epsilon}} = \frac{0,002 \text{ m}}{\sqrt{1-0,75}} = 0,004 \text{ m}$$

Untuk nilai massa jenis (ρ), viskositas (μ) dan difusivitas (D), pelarut diasumsikan sebagai air:

$$\rho = 987,77 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 8,904 \times 10^{-4} \text{ kg/ms}$$

$$D = 1,4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Bilangan Reynold (Re)} = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{987,77 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,6450 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,004 \text{ m}}{8,904 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}} = 2862,37$$

$$\text{Bilangan Sherwood (Sh)} = k \frac{d_e}{D} = 0,00730 \text{ m/s} \frac{0,004 \text{ m}}{1,4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}} = 208,51$$

2.3 Pengolahan Data Hidrodinamika

$$\Delta P \text{ rata-rata} = 81,33 \text{ in H}_2\text{O} \times \frac{3,2808 \text{ ft}}{39,37 \text{ in}} \times \frac{1 \text{ psia}}{2,311 \text{ ft H}_2\text{O}} \times \frac{6,89476 \times 10^3 \text{ Pa}}{1 \text{ psia}} = 20220,98 \text{ Pa}$$

Dibuat plot antara v_L dan ΔP rata-rata (Pa) dan diperoleh intercept = - 3015, sehingga:

ΔP setelah kalibrasi = 20220,98 - 3015 = 17205,98 Pa

$$\text{Friksi modul} = \frac{d_e \Delta P}{2 L_f \rho v^2} = \frac{0,004 \text{ m} \times 17205,98 \text{ Pa}}{2 \times 0,47 \text{ m} \times 987,77 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (0,6451 \text{ m/s})^2} = 0,1781$$

Menurut literatur:

- Faktor friksi untuk aliran laminar ($Re < 2.100$) = $f = \frac{16}{Re}$
- Faktor friksi untuk aliran turbulen ($2.100 < Re < 100.000$) = $f = \frac{0,0791}{Re^{1/4}}$

Karena $Re = 2862,37 =$ turbulen, maka:

$$\text{Friksi literatur} = f = \frac{0,0791}{Re^{1/4}} = \frac{0,0791}{2862,37^{1/4}} = 0,0108$$

$$\text{Rasio friksi} = f_{\text{ratio}} = \frac{f_{\text{modul}}}{f_{\text{literatur}}} = \frac{0,1781}{0,0108} = 16,4729$$

Lampiran 3 Hasil Pengolahan Data

3.1 Studi Perpindahan Massa

3.1.1 Hasil pengolahan data perpindahan massa untuk modul 16 serat

Laju alir (L/jam)	Q gas output		C_1	J_{CO_2}	k_L
	cm^3/s	L/menit			
350	2,2388	0,1343	0,00000776	0,0023177	0,00730
400	2,1802	0,1308	0,00000776	0,0024417	0,00834
450	2,1583	0,1295	0,00000741	0,0024882	0,00896
500	2,0747	0,1245	0,00000724	0,0026652	0,00973
550	1,9920	0,1195	0,00000724	0,0028402	0,01070
600	1,9317	0,1159	0,00000692	0,0029679	0,01115

Laju alir (L/jam)	v_L (m/s)	Re	Sh
350	0,6451	2862,37	208,51
400	0,7372	3271,28	238,30
450	0,8294	3680,19	256,02
500	0,9215	4089,10	277,99
550	1,0137	4498,01	305,78
600	1,1058	4906,92	318,56

3.1.2 Hasil pengolahan data perpindahan massa untuk modul 12 serat

Laju alir (L/jam)	Q gas output		C_1	J_{CO_2}	k_L
	cm^3/s	L/menit			
350	1,8248	0,1095	0,00000813	0,0043599	0,01025
400	1,6722	0,1003	0,00000794	0,0047906	0,01145
450	1,6429	0,0986	0,00000794	0,0048734	0,01288
500	1,4881	0,0893	0,00000776	0,0053105	0,01398
550	1,1905	0,0714	0,00000724	0,0061508	0,01435
600	1,1364	0,0682	0,00000724	0,0063036	0,01566

Laju alir (L/jam)	v_L (m/s)	Re	Sh
350	0,5954	3050,93	338,11
400	0,6805	3486,78	377,61
450	0,7656	3922,63	424,81
500	0,8506	4358,47	461,26
550	0,9357	4794,32	473,51
600	1,0207	5230,17	516,55

3.1.3 Hasil pengolahan data perpindahan massa untuk modul 5 serat

Laju alir (L/jam)	Q gas output		C_1	J_{CO_2}	k_L
	cm^3/s	L/menit			
350	2,6110	0,1567	0,00000724	0,0051367	0,02192
400	2,5751	0,1545	0,00000724	0,0053797	0,02505
450	2,5575	0,1535	0,00000692	0,0054987	0,02691
500	2,5042	0,1503	0,00000661	0,0058604	0,02856
550	2,4631	0,1478	0,00000661	0,0061390	0,03141
600	2,4116	0,1447	0,00000617	0,0064878	0,03198

Laju alir (L/jam)	v_L (m/s)	Re	Sh
350	0,5248	4165,71	1120,34
400	0,5998	4760,82	1280,39
450	0,6747	5355,92	1375,58
500	0,7497	5951,02	1459,60
550	0,8247	6546,12	1605,56
600	0,8996	7141,23	1634,57

3.2 Studi Hidrodinamika

3.2.1 Hasil pengolahan data hidrodinamika untuk modul 16 serat

Laju alir (L/jam)	ΔP rata-rata (in H ₂ O)	ΔP rata-rata (Pa)	ΔP setelah kalibrasi (Pa)	f modul	f literatur	f rasio
350	81,33	20220,98	17205,98	0,1781	0,0108	16,4729
400	83,00	20635,34	17620,34	0,1397	0,0105	13,3543
450	106,67	26519,31	23504,31	0,1472	0,0102	14,4956
500	122,33	30414,34	27399,34	0,1390	0,0099	14,0525
550	129,00	32071,79	29056,79	0,1218	0,0097	12,6132
600	141,00	35055,22	32040,22	0,1129	0,0095	11,9438

3.2.2 Hasil pengolahan data hidrodinamika untuk modul 12 serat

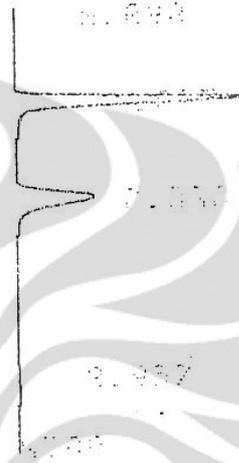
Laju alir (L/jam)	ΔP rata-rata (in H ₂ O)	ΔP rata-rata (Pa)	ΔP setelah kalibrasi (Pa)	f modul	f literatur	f rasio
350	37,00	9198,89	7247,89	0,1017	0,0106	9,5548
400	42,67	10607,73	8656,73	0,0930	0,0103	9,0340
450	45,33	11270,71	9319,71	0,0791	0,0100	7,9143
500	51,67	12845,29	10894,29	0,0749	0,0097	7,6937
550	58,67	14585,62	12634,62	0,0718	0,0095	7,5519
600	69,33	17237,55	15286,55	0,0730	0,0093	7,8465

3.2.3 Hasil pengolahan data hidrodinamika untuk modul 5 serat

Laju alir (L/jam)	ΔP rata-rata (in H ₂ O)	ΔP rata-rata (Pa)	ΔP setelah kalibrasi (Pa)	f modul	f literatur	f rasio
350	27,00	6712,70	9726,70	0,2722	0,0098	27,6436
400	28,33	7044,19	10058,19	0,2155	0,0095	22,6289
450	30,00	7458,56	10472,56	0,1773	0,0092	19,1725
500	33,00	8204,41	11218,41	0,1538	0,0090	17,0798
550	34,67	8618,78	11632,78	0,1318	0,0088	14,9898
600	37,00	9198,89	12212,89	0,1163	0,0086	13,5146

Lampiran 4 Hasil Analisis Sampel dengan GC TCD

Pada hasil analisis sampel dengan menggunakan GC TCD diperoleh grafik dan data sebagai berikut:



No	Time retention	Komponen	Konsentrasi (%)
1	0,098	Pengotor 1	0,742
2	1,007	Pengotor 2	60,0612
3	2,038	CH ₄	35,1524
4	3,957	CO ₂	4,0444

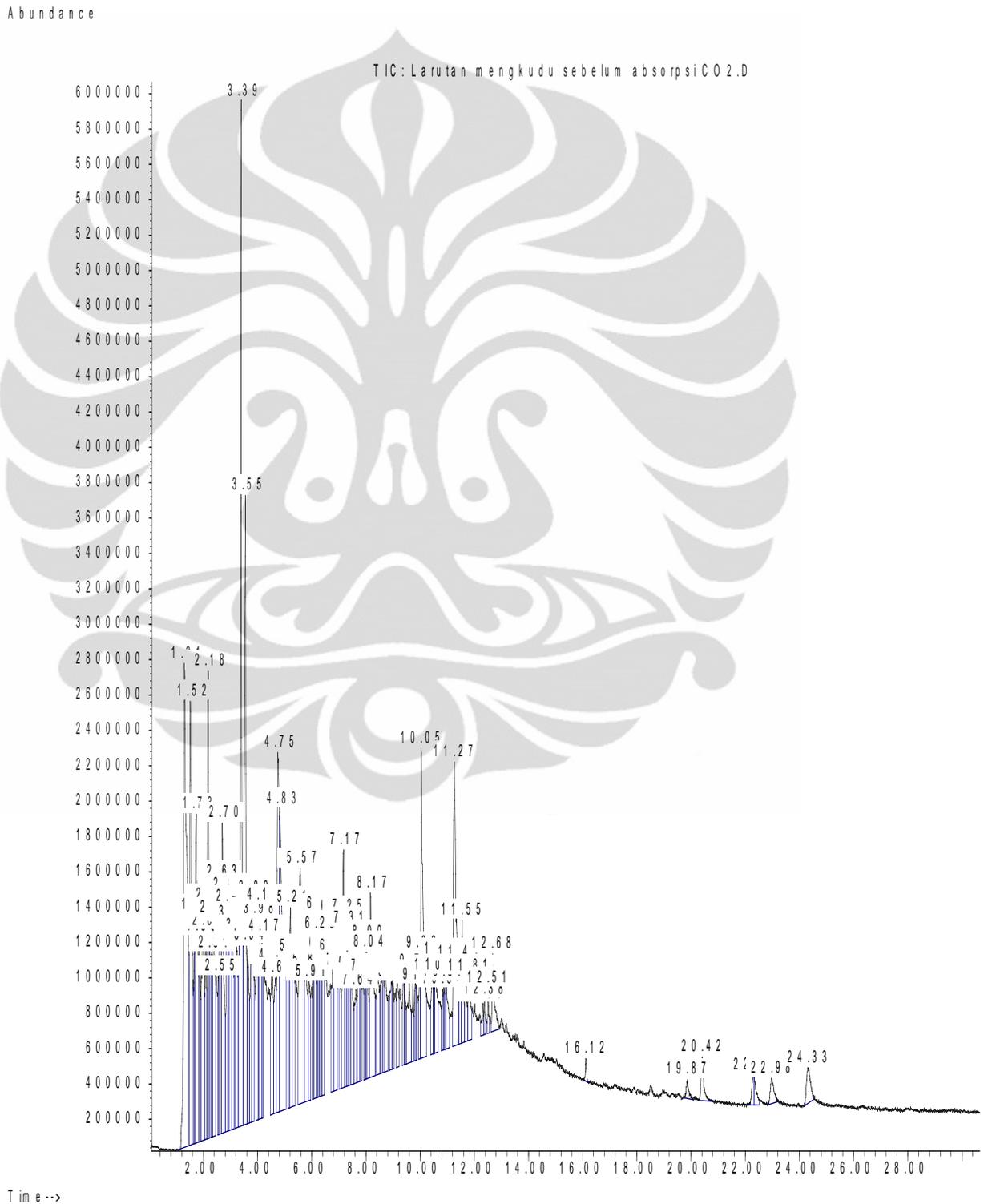
Maka,

$$\text{Konsentrasi CO}_2 = \frac{\text{Konsentrasi CO}_2}{\text{Konsentrasi CO}_2 + \text{CH}_4} \times 100 \% = \frac{4,0444}{4,0444 + 35,1524} \times 100 \% = \frac{4,0444}{39,1968} \times 100 \% = 10,32 \%$$

Lampiran 5 Hasil analisis sampel dengan GC/MS

5.1 Analisis Sampel Sebelum Absorpsi CO₂

Pada hasil analisis sampel sebelum absorpsi CO₂ dengan GC/MS diperoleh grafik kromatogram sebagai berikut:



Berikut ini tabel komponen senyawa yang terdapat dalam sampel sebelum absorpsi CO₂:

Peak	Retention Time	% Area	Library Search Report	Match Quality (%)
1	1,30	6,54	Hydrazine, 1, 2 – dimethyl -, dihydrochloride	9
2	1,52	4,37	Butanedial	50
3.	1,67	0,97	Furfural	46
4.	1,73	2,98	2 - Furanmethanol	76
5.	1,85	1,33	4-Cyclopentene-1,3-dione	50
6.	1,99	2,39	4 - Nonenal	18
7.	2,09	1,16	1 – Ethynyl – 1 - cycloheptanol	49
8.	2,18	2,64	1 – methoxy – 1, 3 - cyclohexadiene	83
9.	2,22	1,07	Octanoic acid	52
10	2,31	0,99	Phenol	58
11.	2,37	2,04	Phenol	46
12.	2,63	1,85	Benzeneacetaldehyde	35
13.	2,69	2,69	Furan, 2 – methyl – 5 – (methylthio)	76
14.	2,86	1,25	2 – Tetrazaboroline, 5 – ethyl – 1, 4 – dimethyl -	47
15.	2,91	0,84	2,5-Dimethyl-4-hydroxy-3(2H)-furan one	30
16.	2,97	1,79	2 – Amino – 6 - methoxypyridine	56
17.	3,07	1,34	Phenol, 2-methoxy-	64
18.	3,23	1,63	2,5-dioxo-3-methylpiperazine	38
19.	3,33	0,98	Ethanamine, N-ethyl-N-nitroso-	27
20.	3,39	5,02	4H – Pyran – 4 – one, 2, 3 – dihydro – 3, 5 – dihydroxy – 6 – methyl -	64
21.	3,56	4,54	Octanoic acid	94
22.	3,63	1,21	Benzenemethanol, α -ethynyl-	50
23.	3,76	0,98	2,4(1H,3H)-Pyrimidinedione, dihydr o-1,3-dimethyl-	47
24.	3,80	1,42	Benzoic acid, 2 – hydroxy -, methyl ester	49
25.	3,99	1,23	4 – Isopropyl – 2 - oxazolidinone	43

Tabel komponen senyawa yang terdapat dalam sampel sebelum absorpsi CO₂
(lanjutan...)

Peak	Retention Time	% Area	Library Search Report	Match Quality (%)
26.	4,03	0,86	Cyclobutene, 1,2,3,4-tetramethyl-,cis-	43
27.	4,11	1,37	2 - Furancarboxaldehyde, 5 - (hydroxymethyl) -	52
28.	4,17	0,66	4-Fluorobenzyl alcohol	46
29.	4,54	1,35	Phenol, 5-methoxy-2,3-dimethyl-	78
30.	4,66	0,87	Cyclohexanone, 2,2-dimethyl-5-(3-methyloxiranyl)-	22
31.	4,75	2,94	1H - Indole	93
32.	4,83	4,13	Benzeneacetonitrile	83
33.	5,16	0,66	Phenol, 2,6-dimethoxy-	83
34.	5,22	1,44	QUINUCLIDINE-3-D	46
35.	5,57	3,36	1H-Indole, 3-methyl-	80
36.	5,79	1,24	1,2-Dipropylcyclopropene-3-carboxylic acid	42
37.	6,05	0,58	Phenol, 2-methoxy-4-(2-propenyl)-	90
38.	6,12	0,97	QUINUCLIDINE-4-D	30
39.	6,21	0,65	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3-methoxy-	58
40.	6,25	0,54	Benzene, 1-(ethylthio)-4-methyl-	50
41.	6,32	1,24	Benzene, 1-(ethylthio)-4-methyl-	38
42.	6,79	0,75	Carbofuran-3-hydroxy-7-phenol	38
43.	6,85	1,45	Benzaldehyde, 2,5-dimethoxy-	53
44.	7,17	1,56	Bicyclo [2.2.2] octanone, 4 - methoxy -	44
45.	7,25	0,71	2,4-Piperidinedione, 3,3-diethyl-5-methyl-	46
46.	7,31	0,81	Quinoline, 2-sec-butyl-	55
47.	7,39	0,52	10-azatricyclo[4.3.1.0(1,6)]deca-3-ene	38
48.	7,64	0,54	7-Oxabicyclo[4.1.0]hept-4-en-3-one, 1,2,2,4,5,6-hexamethyl-	46
49.	7,74	0,70	1-deuteromethyl-6-methyl-pyrimido[5,4-e][1.2.4]triazine-5-one	68

Tabel komponen senyawa yang terdapat dalam sampel sebelum absorpsi CO₂
(lanjutan...)

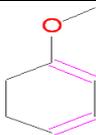
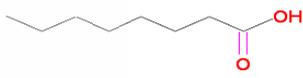
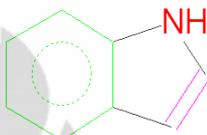
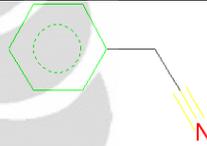
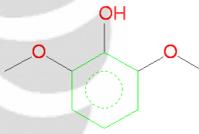
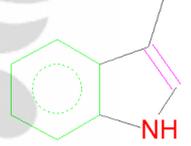
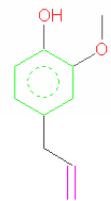
Peak	Retention Time	% Area	Library Search Report	Match Quality (%)
50.	7,79	0,60	Naphthalene, 2,3,6-trimethyl-	78
51.	7,95	0,30	(1E,5E)-2-methyl-1-(phenylsulfinyl)hepta-1,5-dien-4-ol	60
52.	8,00	0,45	Benzene, 1-methyl-4-(methylthio)-	64
53.	8,04	0,60	2-Oxa-6-azatricyclo[3.3.1.1 ^{3,7}]decane-6-carboxaldehyde	60
54.	8,17	1,57	2-Ethyl-3-methoxypyrazine	64
55.	8,43	0,69	9H-Pyrido[3,4-b]indole	25
56.	8,60	0,56	1H-Pyrrole-2-carboxylic acid, 1-ethenyl-	46
57.	8,99	0,28	Benzene, 1-ethoxy-4-methyl-	49
58.	9,16	0,37	Benzene, 1-methoxy-3-(methylthio)-	38
59.	9,38	0,25	14S,20R-Velbanamine	55
60.	9,41	0,19	N1,N1-Dimethyl-N2-(trifluoromethyl)formamidine	46
61.	9,60	0,34	Hexadecanenitrile	90
62.	9,73	0,14	Hexadecanoic acid, methyl ester	96
63.	9,83	0,14	1H-Indole-3-acetic acid, ethyl ester	60
64.	9,85	0,12	1H-Indole-3-acetamide	45
65.	9,99	0,24	8-(Hydroxymethyl)-5-propyloctahydroindolizine	46
66.	10,05	2,03	Hexadecanoic acid	98
67.	10,45	0,14	1,2,5,5,6,7-Hexamethylbicyclo[4.1.0]hept-2-en-4-one	78
68.	10,56	0,21	1-(1,3-Dimethyl-2-butenyl)-4-methoxy-1,4-cyclohexadiene	81
69.	10,87	0,10	1,2-Naphthalenediol, 1,2,3,4-tetrahydro-1-phenyl-, cis- Boroxin, tributyl-	72
70.	10,93	0,12	8,11-Octadecadienoic acid, methyl ester	91
71.	10,97	0,19	Z-11-Tetradecenoic acid	72
72.	11,26	2,58	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-	97

Tabel komponen senyawa yang terdapat dalam sampel sebelum absorpsi CO₂
(lanjutan...)

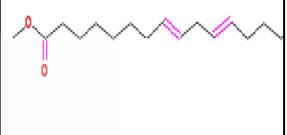
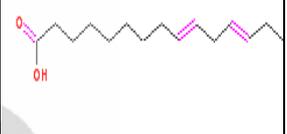
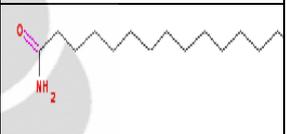
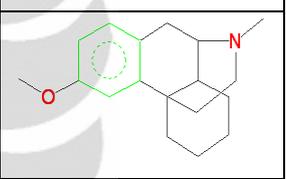
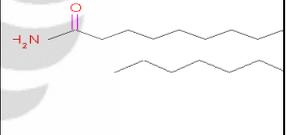
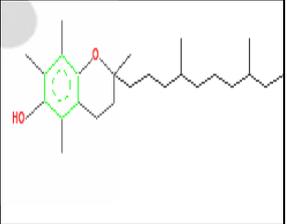
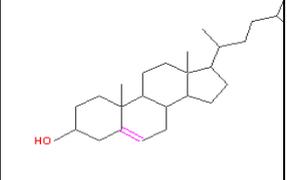
Peak	Retention Time	% Area	Library Search Report	Match Quality (%)
73.	11,43	0,32	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-	95
74.	11,55	0,53	Hexadecanamide	98
75.	11,67	0,30	3-Methoxy-N-methylmorphinan	97
76.	11,80	0,37	6-phenyl-4-methyl-3-oxoisothiazolo[5,4-b]pyridine	53
77.	12,33	0,09	2-(1'-METHYLINDOL-3'-YL)ETHENE-1,1-DECARBONITRILE	40
78.	12,38	0,10	2-chloro-4-(diallylamino)-6-(1-methylpropylamino)-1,3,5-triazine	25
79.	12,51	0,14	Hexanal, (2,4-dinitrophenyl)hydrazone	53
80.	12,67	0,70	9-Octadecenamide, (Z)-	91
81.	16,12	0,12	Trichothec-9-en-4-ol, 7,8:12,13-di epoxy-, 2-butenate, [4.beta.(Z),7.beta.,8.beta.]-	46
82.	19,87	0,18	Stigmastan-3,5-dien	78
83.	20,41	0,53	Vitamin e	96
84.	22,30	0,22	Campesterol	48
85.	22,34	0,19	Ergost-5-en-3-ol, (3.beta.)-	93
86.	22,98	0,37	2-Ethylacridine	45
87.	24,33	0,56	(13.alpha.) Androsta-5,7-dien-3-one, 17,19-diacetoxy-4,4-dimethyl-24.XI-ETHYLCHOLEST-5-EN-3.BETA.-OL	51

Catatan: Data yang dapat digunakan hanyalah yang memiliki match quality diatas 80 %.

Untuk memudahkan analisis, berikut ini adalah senyawa-senyawa yang terdapat pada sampel sebelum absorpsi CO₂ yang memenuhi match quality diatas 80 % :

Peak	Match Quality (%)	Library Search Report	Rumus kimia	Struktur
8.	83	1 - methoxy - 1, 3 - cyclohexadiene	$C_7H_{10}O$	
21.	94	Octanoic acid	$C_8H_{16}O_2$	
31.	93	1H - Indole	C_8H_7N	
32.	83	Benzeneacetonitrile	C_8H_7N	
33.	83	Phenol, 2,6-dimethoxy	$C_8H_{10}O_3$	
35.	80	1H-Indole, 3-methyl	C_9H_9N	
37.	90	Phenol, 2-methoxy-4-(2-propenyl)	$C_{10}H_{12}O_2$	
66.	98	Hexadecanoic acid	$C_{16}H_{32}O_2$	
68.	81	1-(1,3-Dimethyl-2-butenyl)-4-methoxy-1,4-cyclohexadiene	$C_{13}H_{20}O$	

Tabel komponen senyawa yang terdapat dalam sampel sebelum absorpsi CO₂ dan memenuhi match quality di atas 80 % (*lanjutan...*)

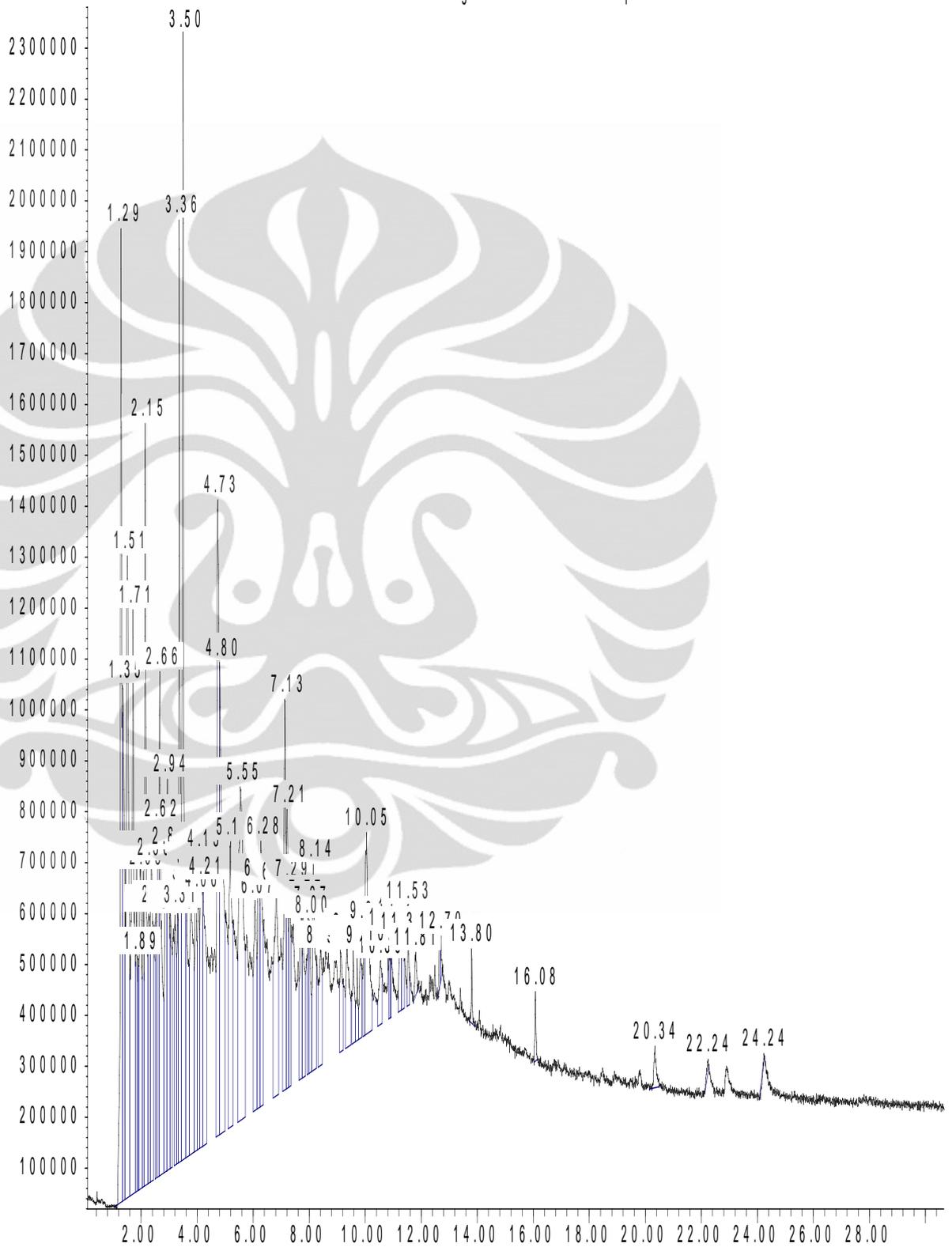
Peak	Match Quality (%)	Library Search Report	Rumus kimia	Struktur
70.	91	8,11-Octadecadienoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	
72.	97	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	
74.	98	Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO	
75.	97	3-Methoxy-N-methylmorphinan	C ₁₈ H ₂₅ NO	
80.	91	9-Octadecenamide, (Z)	C ₁₈ H ₃₅ NO	
83.	96	Vitamin e	C ₂₉ H ₅₀ O ₂	
85.	93	Ergost-5-en-3-ol, (3.beta.)	C ₂₈ H ₄₈ O	

5.2 Analisis Sampel Setelah Absorpsi CO₂

Pada hasil analisis sampel setelah absorpsi CO₂ dengan GC/MS diperoleh grafik kromatogram sebagai berikut:

Abundance

TIC: Larutan mengkudu setelah absorpsi CO₂D



Time-->

Berikut ini tabel komponen senyawa yang terdapat dalam sampel setelah absorpsi CO₂:

Peak	Retention Time	% Area	Library Search Report	Match Quality (%)
1.	1,28	3,49	Urea	7
2.	1,34	2,61	CYCLOPROPYL CARBINYL-D2-METHYL ETHER	25
3.	1,51	4,34	1-Butanol, 4-methoxy-	38
4.	1,71	3,97	2 - Furanmethanol	90
5.	1,84	1,11	4-Cyclopentene-1,3-dione	80
6.	1,88	0,60	ethyl 2-oxo-3-phenylamino-propanoate	38
7.	1,98	1,96	1,1-DIDEITERO-1-SILACYCLOHEXADIENE-2,5	30
8.	2,08	1,08	Ω.-D2-.γ.-PICOLINE	41
9.	2,15	3,16	Hexanoic acid	64
10.	2,27	1,34	Phenol	70
11.	2,36	1,96	Phenol	58
12.	2,46	0,80	Phenol	58
13.	2,53	0,98	Phenol	49
14.	2,62	1,42	Oxirane, phenyl-	50
15.	2,67	2,84	2,5-Dimethyl-4-hydroxy-3(2H)-furan one	64
16.	2,90	1,60	4-HYDROXY-2,5-DIMETHYL-3(2H)-FURAN ONE	30
17.	2,94	2,10	Phenol, 2-methoxy-	60
18.	3,05	1,17	Phenol, 2-methoxy-	62
19.	3,14	0,92	ISONICOTINIC ACID-D1-.BETA.-D2	49
20.	3,20	1,26	(E)-5-Cyano-2-hexenoic acid	27
21.	3,31	0,75	Ethanamine, N-ethyl-N-nitroso-	18
22.	3,19	5,02	4H - Pyran - 4 - one, 2, 3 - dihydro - 3, 5 - dihydroxy - 6 - methyl -	64
23.	3,50	4,82	Octanoic acid	97
24.	3,61	1,67	Benzenemethanol, α -ethynyl-	62
25.	3,78	2,42	2,4,6-Heptanetrione	27

Tabel komponen senyawa yang terdapat dalam sampel setelah absorpsi CO₂
(lanjutan...)

Peak	Retention Time	% Area	Library Search Report	Match Quality (%)
26.	3,94	1,46	2-Pentanone, 5-(diethylamino)-	47
27.	4,06	1,29	Methyl (E)-5-Methyl-2,4-hexadienoate	38
28.	4,15	1,51	2-Propyl-2-pentenal	35
29.	4,21	2,02	1-Ethyl-2-hydroxymethylimidazole	43
30.	4,73	3,36	1H - Indole	95
31.	4,80	3,88	1H-Indole	81
32.	5,18	2,48	QUINUCLIDINE-3-D	43
33.	5,55	4,03	1H-Indole, 7-methyl-	86
34.	6,07	1,50	trans-1,10-Dimethyl-trans-9-decal Geosmin	42
35.	6,18	1,22	Piperidine, 1-(cyanoacetyl)-	49
36.	6,28	1,46	2-(2-Methyl-propenyl)-cyclohexanon	38
37.	6,37	1,39	2H-Inden-2-one, 1,3-dihydro-, oxime	46
38.	6,82	1,98	thio-carvacrol	43
39.	6,99	1,17	3-n-Pentyl-2-cyclohexen-1-one	90
40.	7,13	1,95	1,2-Benzenedicarboxylic acid, diethyl ester	46
41.	7,21	1,08	1,2-Benzenedicarboxylic acid, diethyl ester	51
42.	7,29	0,92	Quinoline, 2-sec-butyl-	64
43.	7,72	0,88	Pyrimido[1,2-a]azepine, 2,3,4,6,7, 8,9,10-octahydro-	52
44.	7,77	0,91	Naphthalene, 1,6,7-trimethyl-	60
45.	7,96	0,51	Benzene, 1-methyl-4-(methylthio)-	58
46.	8,00	0,70	1,4-Benzenediol, 2,6-dimethyl-	94
47.	8,15	1,34	Benzene, 1-methyl-4-(methylthio)-	62
48.	8,27	0,27	3,4-Diaminobenzoic acid	90
49.	8,41	0,95	9-Borabicyclo[3.3.1]nonane, 9-(5-hexenyl)-	76
50.	8,59	0,77	2H-Benzocyclohepten-2-one, 3,4,4a,	45
51.	8,92	0,58	1H-Indole, 5-methyl-	55

Tabel komponen senyawa yang terdapat dalam sampel setelah absorpsi CO₂
(lanjutan...)

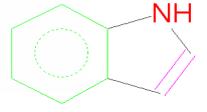
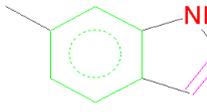
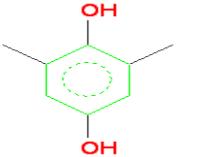
Peak	Retention Time	% Area	Library Search Report	Match Quality (%)
52.	9,12	0,61	1-Hydroxy-4-hydrazonomethyl-2,2,5, 5-tetramethyl-3-imidazoline	44
53.	9,35	0,85	1,4-Dioxaspiro[4.5]decane, 6-methylene-	64
54.	9,57	0,39	Hexadecanenitrile	64
55.	9,72	0,30	Hexadecanoic acid, methyl ester	64
56.	9,83	0,45	2-Acetoxytetralin	50
57.	9,89	0,14	3-Indolylacetone	50
58.	9,95	0,39	Benzene, 1-methoxy-3-(methylthio)-	51
59.	10,05	1,66	2-Hydroxy-3,5,5-trimethyl-cyclohex-2-enone	46
60.	10,55	0,44	3,4-Dimethoxy-5-hydroxybenzaldehyde	89
61.	10,82	0,18	2H-Pyran-5-carboxylic acid, 6-methyl-2-oxo-, methyl ester	25
62.	10,85	0,21	Hexadecenitrile	46
63.	10,91	0,18	2(1H)-Naphthalenone, octahydro-4a-methyl-7-(1-methylethyl)-	90
64.	10,94	0,26	3-HYDROXY-2-METHOXY-6-METHOXYMETHYL-4,4-DIMETHYL-2,5-CYCLOHEXADIENONE	45
65.	11,24	0,45	5,6,6-Trimethyl-5-(3-oxobut-1-enyl)-1-oxaspiro[2.5]octan-4-one	64
66.	11,34	0,35	3,3,7,7-Tetramethyl-1,5-diazabicyclo[3.3.0]octane-2,6-dithione	55
67.	11,41	0,16	2(1H)-Naphthalenone, octahydro-4a-methyl-7-(1-methylethyl)-	91
68.	11,53	0,30	Hexadecanamide	95
69.	11,80	0,18	6-phenyl-4-methyl-3-oxoisothiazolo[5,4-b]pyridine	55
70.	12,49	0,06	1-Acetyl-6,8-dimethoxy-5-nitro-1,2,3,4-tetrahydroquinoline	41
71.	12,66	0,15	Z-11-Pentadecenol	91

Tabel komponen senyawa yang terdapat dalam sampel setelah absorpsi CO₂
(lanjutan...)

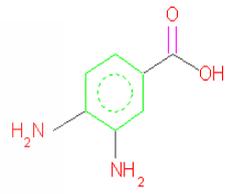
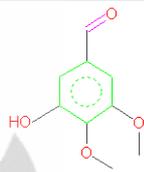
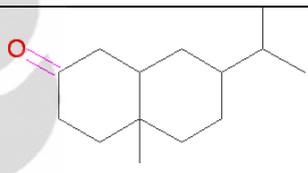
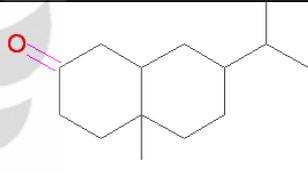
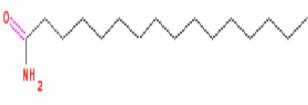
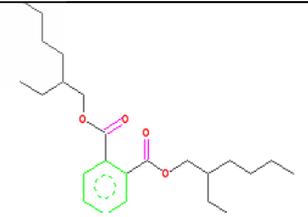
Peak	Retention Time	% Area	Library Search Report	Match Quality (%)
72.	12,70	0,09	Benz[e]azulene-3,8-dione,	60
73.	13,80	0,17	Bis(2-ethylhexyl) phthalate	83
74.	16,07	0,19	TRIVINYL-S-TRIAZINE-2,4,6-(1H,3H,5H)-TRIONE	42
75.	20,34	0,25	Vitamin E	87
76.	22,25	0,18	2-Propen-1-one, 3-[4-(1-methylethyl)phenyl]-1-phenyl-	55
77.	22,91	0,01	1,1,1,3,5,5,5-Heptamethyltrisiloxane	70
78.	24,24	0,11	Anthracene, 9,10-diethyl-9,10-dihydro-	49
79.	24,26	0,06	1,3-dimethyl-4-azaphenanthrene	42

Catatan: Data yang dapat digunakan hanyalah yang memiliki match quality diatas 80 %.

Untuk memudahkan analisis, berikut ini adalah senyawa-senyawa yang terdapat pada sampel setelah absorpsi CO₂ yang memenuhi match quality diatas 80 % :

Peak	Match Quality (%)	Library Search Report	Rumus kimia	Struktur
30.	95	1H - Indole	C ₈ H ₇ N	
33.	86	1H-Indole, 7-methyl-	C ₉ H ₉ N	
39.	90	3-n-Pentyl-2-cyclohexen-1-one	C ₁₁ H ₁₈ O	
46.	94	1,4-Benzenediol, 2,6-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O ₂	

Tabel komponen senyawa yang terdapat dalam sampel setelah absorpsi CO₂ dan memenuhi match quality di atas 80 % (lanjutan...)

Peak	Match Quality (%)	Library Search Report	Rumus kimia	Struktur
48.	90	3,4-Diaminobenzoic acid	C ₇ H ₈ N ₂ O ₂	
60.	89	3,4-Dimethoxy-5-hydroxybenzaldehyde	C ₉ H ₁₀ O ₄	
63.	90	2(1H)-Naphthalenone, octahydro-4a-methyl-7-(1-methylethyl)-	C ₁₄ H ₂₄ O	
67.	91	2(1H)-Naphthalenone, octahydro-4a-methyl-7-(1-methylethyl)-	C ₁₄ H ₂₄ O	
68.	95	Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO	
71.	91	Z-11-Pentadecenol	C ₁₅ H ₃₀ O	
73.	83	Bis(2-ethylhexyl) phthalate	C ₂₄ H ₃₈ O ₄	
75.	87	Vitamin E	C ₂₉ H ₅₀ O ₂	