



SKRIPSI – TK141581

**STUDI KINETIKA ABSORPSI KARBON DIOKSIDA
MENGGUNAKAN LARUTAN DIETHANOLAMINE (DEA)
BERPROMOTOR GLYCINE**

Oleh :
MARIA HESTIA INTAN C
NRP. 2311100045

KARTIKA ARSI
NRP. 2311100202

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Susianto, DEA
NIP.1962 08 20 1989 03 1004
Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc
NIP. 1951 08 04 1974 12 1001

JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2015



SKRIPSI – TK141581

**STUDI KINETIKA ABSORPSI KARBON DIOKSIDA
MENGGUNAKAN LARUTAN *DIETHANOLAMINE (DEA)*
BERPROMOTOR *GLYCINE***

Oleh :
MARIA HESTIA INTAN C
NRP. 2311100045

KARTIKA ARSI
NRP. 2311100202

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Susianto, DEA
NIP.1962 08 20 1989 03 1004
Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc
NIP. 1951 08 04 1974 12 1001

JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2015



FINAL PROJECT– TK091383

KINETIC STUDY OF CARBON DIOXIDE ABSORPTION INTO GLYCINE PROMOTED DIETHANOLAMINE (DEA)

Presented By :
MARIA HESTIA INTAN C
NRP. 2311100045

KARTIKA ARSI
NRP. 2311100202

Adviser :
Dr. Ir. Susianto, DEA
NIP.1962 08 20 1989 03 1004
Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc
NIP. 1951 08 04 1974 12 1001

CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2015

LEMBAR PENGESAHAN

Studi Kinetika Absorpsi Karbodioksida *Diethanolamine* (DEA) Berpromotor Senyawa Glycine

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

Oleh :

Maria Hestia Intan C 2311 100 045
Kartika Arsi 2311 100 202

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr.Ir. Susianto, DEA  (Pembimbing 1)
2. Prof.Dr.Ir. Ali Altway, MS  (Pembimbing 2)
3. Ir. Nuniek Hendrianie, M.T  (Penguji I)
4. Fadlilatul Taufany S.T, Ph.D  (Penguji II)
5. Dr. Yeni Rahmawati S.T, M.T  (Penguji III)



Surabaya
Juli, 2015

STUDI KINETIKA ABSORPSI KARBON DIOKSIDA MENGGUNAKAN LARUTAN DIETHANOLAMINE (DEA) BERPROMOTOR GLYCINE

Mahasiswa : Maria Hestia Intan.C(2311100045)
Kartika Arsi (2311100202)

Pembimbing I : Dr. Ir. Susianto, DEA

Pembimbing II : Prof. Dr. Ali Altway, M.Sc

ABSTRAK

Dalam dunia industri, khususnya industri petrokimia dan minyak gas alam pada prosesnya diperlukan pemisahan gas CO₂ dimana gas ini merupakan gas yang korosif (*acid gas*). Sifat ini dapat merusak bagian dalam utilitas pabrik dan sistem perpipaannya serta mengurangi nilai kalor dari gas alam. Sifat korosif CO₂ akan muncul pada daerah dimana terdapat penurunan temperatur dan tekanan, seperti pada bagian elbow pipa, *tubing*, *cooler* dan injektor turbin. Dari kerugian seperti yang dijelaskan di atas, maka perlu dilakukan proses pemisahan CO₂ dari aliran gas, salah satu cara untuk menghilangkan CO₂ dari aliran gas adalah absorpsi reaktif menggunakan pelarut berbasis alkanolamine yang berkatalis. Oleh karena itu, dilakukan penelitian ini untuk menentukan data kinetika reaksi absorpsi CO₂ dalam larutan *diethanolamine* (DEA) dengan menggunakan promotor *glycine*. Pemilihan *glycine* sebagai promotor dikarenakan *glycine* merupakan senyawa amine primer yang bersifat reaktif, selain itu *glycine* mempunyai ketahanan terhadap suhu tinggi sehingga tidak mudah terdegradasi sesuai untuk diaplikasikan di dunia industri. Metode yang digunakan adalah absorpsi menggunakan peralatan *wetted wall column* skala laboratorium pada tekanan 1 atm. Dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi data kinetika reaksi sebagai upaya untuk mengoptimalkan proses pemisahan karbon dioksida di dunia industri. Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah bahwa

kenaikan temperatur dari 303,15 - 328,15 K akan meningkatkan laju absorpsi gas karbon dioksida berpromotor *glycine* sebesar 24,2% dan kenaikan konsentrasi promotor *glycine* dari 1% - 3% berat dalam larutan *diethanolamine* menghasilkan kenaikan laju absorpsi gas karbon dioksida sebesar 59,764% serta didapatkan persamaan konstanta kinetika reaksi *glycine* yaitu $1.419 \times 10^{12} \exp(-3634/T)$ ($\text{m}^3/\text{kmol.s}$). Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan *glycine* sebagai promotor dapat menambah laju absorpsi karbon dioksida pada larutan *diethanolamine* dan mampu menutupi kelemahan larutan *diethanolamine*.

Kata kunci: absorpsi, CO_2 , promotor, wetted wall column

KINETIC STUDY OF CARBON DIOXIDE ABSORPTION INTO GLYCINE PROMOTED DIETHANOLAMINE (DEA) SOLUTION

Mahasiswa : Maria Hestia Intan.C(2311100045)
Kartika Arsi (2311100202)

Pembimbing I : Dr. Ir. Susianto, DEA

Pembimbing II : Prof. Dr. Ali Altway, M.Sc

ABSTRACT

In industry, especially petrochemical, oil and natural gas industry, required separation process of CO₂ gas which is a corrosive gas (acid gas). This characteristic can damage the plant utility and piping systems as well as reducing the caloric value of natural gas. Corrosive characteristic of CO₂ will appear in areas where there is a decrease in temperature and pressure, such as at the elbow pipe, tubing, cooler and injector turbine. From disadvantages as described above, then it is important to do separation process in the CO₂ gas stream, one of the method for remove CO₂ from the gas stream is reactive absorption using alkanolamine based solution with promotor. Therefore, this study is done to determine the kinetics constant of CO₂ absorption in *diethanolamine* (DEA) solution using a *glycine* promoter. *Glycine* is chosen as a promoter because *glycine* is a primary amine compound which is reactive, moreover, *glycine* has resistance to high temperatures so it will not easy to degradable and suitable for application in industry. The method used in this study is absorption using laboratory scale *wetted wall column* equipment at atmospheric of pressure. This study will to provide the reaction kinetics data information in order to optimize the separation process of CO₂ in the industrialized world. The experimental results show that rising temperatures from 303,15 – 328,15 K and the increase of concentration of *glycine* from 1% - 3% weight will increase the absorption rate of carbon dioxide in DEA promotored

with *glycine* by 24,2% and 59,764% respectively, also the reaction kinetic constant is $1.419 \times 10^{12} \exp(-3634/T)$ ($\text{m}^3/\text{kmol.s}$). This result show that the addition of *glycine* as a promoter can increase absorption rate of carbon dioxide in *diethanolamine* solution and cover the weaknesses of *diethanolamine* solution.

Keywords: absorption, CO₂, promoter, wetted wall column

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami sampaikan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena hanya dengan rahmat dan berkah-Nya kami dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul :

”STUDI KINETIKA ABSORPSI KARBON DIOKSIDA MENGGUNAKAN LARUTAN DIETHANOLAMINE BERPROMOTOR GLYCINE”

Skripsi ini merupakan persyaratan kelulusan Program Studi S-1 di Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada kesempatan ini kami menyampaikan banyak terima kasih kepada :

1. Bapak Prof.Dr.Ir.Tri Widjaja, M.Eng, selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS
2. Bapak Dr. Ir. Susianto, DEA selaku dosen Pembimbing I yang telah memberikan banyak masukan bagi kami.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc selaku Kepala Laboratorium Perpindahan Panas Massa dan Pemisahan serta dosen Pembimbing II kami.
4. Bapak Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D, Ibu Yeny Rahmawati, ST., MT. dan Ibu Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D selaku dosen Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa.
5. Bapak Ashari dan Bapak Dwi Satriyo A. dari PT. Petrokimia Gresik atas bantuannya untuk menyediakan sampel bahan *Diethanolamine*.
6. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Kimia FTI – ITS.
7. Kedua orang tua kami dan keluarga yang telah banyak memberikan dukungan moral, spiritual, dan material.
8. Rekan-rekan seperjuangan dari laboratorium Perpindahan Panas Massa dan Pemisahan Teknik Kimia FTI-ITS, terutama arek-arek LTD MANIA (Deffry-Pendi, Pranata-Rydh, Ardhiya-BobbyR, Nadia-Dimas, Binsar-Fadlan)

9. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini.

Kami menyadari materi yang kami sajikan ini masih jauh dari sempurna oleh karena itu kami sangat mengharapkan saran dan masukan yang konstruktif demi kesempurnaan laporan ini.

Surabaya, 15 Juni 2015

Penyusun

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	
BAB I PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	5
I.3 Tujuan Penelitian	6
I.4 Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 Karbon Dioksida	7
II.2 Metode Pemisahan Karbon Dioksida	9
II.3 Pemilihan Pelarut	11
II.4 Kinetika Reaksi Absorpsi Karbon Dioksida	14
II.5 Absorpsi Karbodioksida dalam <i>Wetted Wall Column</i>	16
II.6 Regim Reaksi	19
II.7 Kelarutan Gas dalam Cairan	20
II.8 Penelitian Terdahulu	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
III.1 Deskripsi Penelitian	24
III.2 Bahan Penelitian dan Peralatan Penelitian	24
III.3 Kondisi Operasi dan Variabel Penelitian	28
III.4 Prosedur Penelitian	29
III.5 Evaluasi Data	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
IV.1 Pengaruh Kenaikan Suhu Terhadap Laju Absorpsi Kabon Dioksida	35
IV.2 Pengaruh Konsentrasi Promotor Terhadap Laju Absorpsi Karbon Dioksida	36

**IV.3 Kereaktifan Promotor *Glycine* pada Absorpsi
Karbon Dioksida**

37

BAB V KESIMPULAN	40
DAFTAR PUSTAKA	xii
DAFTAR NOTASI	xvi
APPENDIKS A	A-1
APPENDIKS B	B-1
LAMPIRAN	

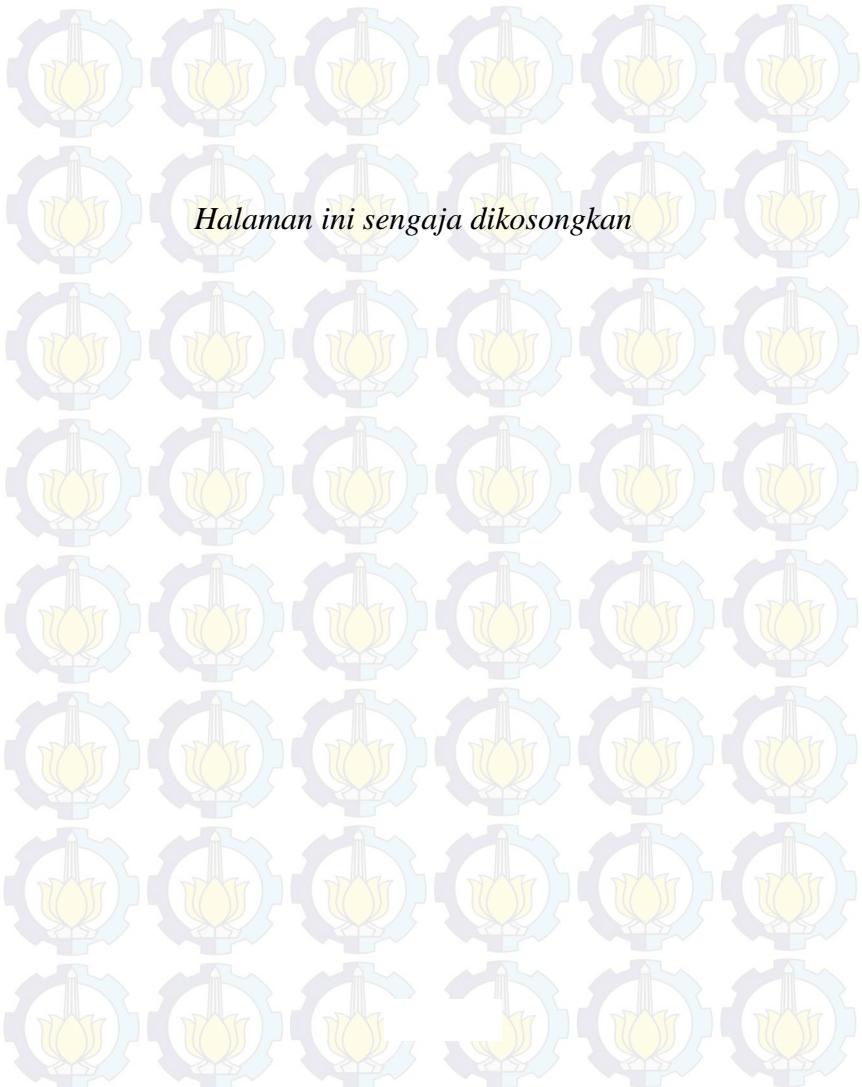
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi Batas Konsentrasi Gas Karbodioksida dalam Proses Industri	7
Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu	22
Tabel 4.1 Perbandingan Persamaan Konstanta Reaksi Absorpsi Karbon Dioksida Berbagai Macam Pelarut	39
Tabel A.1 Data kalibrasi rotameter liquid	A-1
Tabel A.2 Data volume HCl sebagai penitran dalam titrasi	A-2
Tabel A.3 Data Perhitungan Konsentrasi <i>Glycine</i> dan Konstanta Kecepatan Reaksi Apparent	A-15
Tabel A.4 Data konstanta kecepatan reaksi <i>glycine</i> pada suhu 303.15 K-328.15 K	A-19
Tabel B.1 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan promotor <i>glycine</i> pada konsentrasi 1% berat	B-1
Tabel B.2 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan promotor <i>glycine</i> pada konsentrasi 2% berat	B-2
Tabel B.3 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan promotor <i>glycine</i> pada konsentrasi 3% berat	B-3
Tabel B.4 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan DEA murni	B-4
Tabel B.5 Data perhitungan konstanta Henry pada berbagai variabel suhu	B-5
Tabel B.6 Hasil perhitungan Diffusivitas 303.15 K -328.15 K	B-6
Tabel B.7 Hasil perhitungan koefisien perpindahan massa sisi gas pada temperatur 303.15 K -328.15K	B-7
Tabel B.8 Hasil perhitungan koefisien perpindahan massa sisi liquid pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor <i>glycine</i> (1; 2; 3 % berat)	B-8
Tabel B.9 Hasil perhitungan koefisien perpindahan massa sisi liquid pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% murni	B-9
Tabel B.10 Hasil perhitungan laju absorpsi, waktu kontak dan C_{Ae} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor <i>glycine</i> (1; 2; 3 % berat)	B-10

Tabel B.11 Hasil perhitungan laju absorpsi, waktu kontak dan C_{Ae} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% murni	B-11
Tabel B.12 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor <i>glycine</i> (1% berat)	B-12
Tabel B.13 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor <i>glycine</i> (2% berat)	B-13
Tabel B.14 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor <i>glycine</i> (3% berat)	B-14
Tabel B.15 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA(30%) murni	B-15
Tabel B.16 Hasil perhitungan $k_{glycine}$ temperatur 303,15 K – 328,15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor <i>glycine</i> (1; 2; 3 % berat)	B-16
Tabel B.17 Hasil perhitungan bilangan Hatta (Ha) dan <i>Enhancement factor</i> (Ei) pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor <i>glycine</i> (1; 2; 3 % berat)	B-17

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kenaikan Emisi Gas CO ₂	1
Gambar 2.1 Distribusi kecepatan <i>Wetted Wall Column</i>	18
Gambar 3.1 Kolom Absorpsi tipe <i>Wetted wall column</i>	26
Gambar 3.2 Skema Peralatan <i>Wetted wall column</i>	27
Gambar 4.1 Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absorpsi karbon dioksida dalam larutan <i>diethanolamine</i> (DEA) berpromotor <i>glycine</i> pada suhu 303.15 K – 328.15 K	35
Gambar 4.2 Peningkatan laju absorpsi tiap konsentrasi promotor pada suhu 303.15 K – 328.15 K	36
Gambar 4.3 Hubungan ln k vs 1/T pada laju absorpsi karbon dioksida dalam larutan <i>diethanolamine</i> berpromotor <i>glycine</i> pada suhu 303.15 K – 328.15 K	38
Gambar A.1 Kalibrasi Rotameter liquid	A-1
Gambar A.2 Pembacaan Keadaan Steady State	A-3
Gambar A.3 Hubungan k_{app} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 303.15 K	A-16
Gambar A.4 Hubungan k _{glycine} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 308.15 K	A-17
Gambar A.5 Hubungan $k_{glycine}$ dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 313.15 K	A-17
Gambar A.6 Hubungan $k_{glycine}$ dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 318.15 K	A-18
Gambar A.7 Hubungan $k_{glycine}$ dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 323.15 K	A-18
Gambar A.8 Hubungan $k_{glycine}$ dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 328.15 K	A-19
Gambar A.9 Hubungan ln $k_{glycine}$ dengan 1/T pada persamaan <i>Arhenius</i>	A-20



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR NOTASI

A	<i>Pre-exponensial factor</i>
B_F	Tebal film (m)
C_{BO}	Konsentrasi awal reaktan (kmol m^{-3})
C_A	Konsentrasi gas CO_2 dalam badan cairan (kmol m^{-3})
C_{Ai}	Konsentrasi gas CO_2 dalam interface (kmol m^{-3})
C_{Ae}	Konsentrasi gas CO_2 berkesetimbangan dalam cairan (kmol m^{-3})
C_i	Konsentrasi ion yang valensinya Z_i (kmol m^{-3})
d	diameter pipa yang dialiri liquida (m)
D_{AG}	Koefisien difusi gas CO_2 ($\text{m}^2 \text{ det}^{-1}$)
D_{AL}	Diffusivitas CO_2 dalam H_2O , ($\text{m}^2/\text{det}^{-1}$)
D_{BL}	Diffusivitas CO_3^{2-} dalam H_2O , ($\text{m}^2 \text{ det}^{-1}$)
E	Energi aktivasi ($\text{kg m}^{-2} \text{ det}^2$)
E_i	<i>Enhancement factor</i>
g	percepatan gravitasi (m s^{-2})
h	tinggi kolom (m)
h	Kekuatan ionic total larutan (m^3/kmol)
h_+, h_-, h_G	Kontribusi ion positif, negatif dan gas terhadap faktor kelarutan ($\text{m}^3 \text{ kmol}^{-1}$)
Ha	Bilangan Hatta
He	Konstanta Henry ($\text{Pa m}^3 \text{ kmol}^{-1}$)

He^0	Konstanta Henry untuk sistem gas-cair ($\text{Pa m}^3 \text{ kmol}^{-1}$)
I	Kekuatan Ionik larutan (ion m^{-3})
k_{app}	$k_{\text{ov}} - k_{\text{OH}^-} [\text{OH}^-] - k_{\text{DEA}} [\text{DEA}] (\text{det}^{-1})$
k_{ov}	Konstanta kecepatan reaksi <i>overall pseudo first order</i> (det^{-1})
k_{OH^-}	Konstanta laju reaksi dari reaksi (2.11) (det^{-1})
$k_{\text{H}_2\text{O}}$	Konstanta laju reaksi dari reaksi (2.10) (det^{-1})
k_{glycine}	Konstanta kecepatan reaksi untuk <i>glycine</i> ($\text{m}^3/\text{kmol.s}$)
$k_{\text{app glycine}}$	$k_{\text{glycine}} [\text{glycine}] (\text{det}^{-1})$
k_g	Koefisien perpindahan massa sisi gas ($\text{kmol m}^{-2} \text{ det}^{-1}$)
k_L	Koefisien perpindahan massa sisi cairan, ($\text{kmol m}^{-2} \text{ det}^{-1}$)
K_{DEA}	Konstanta reaksi <i>Diethanolamine</i> (DEA)
K_1	Konstanta equilibrium ionisasi pertama dari asam karbonat (kmol m^{-3})
K_2	Konstanta equilibrium ionisasi kedua dari asam karbonat (kmol m^{-3})
K_w	Konstanta ionisasi air ($\text{kmol}^2 \text{ mol}^{-6}$)
K_{eq}	Konstanta equilibrium ionisasi pertama H_2O dengan carbamate (kmol m^{-3})
K_c	Konstanta equilibrium ionisasi DEA dengan karbondioksida (kmol m^{-3})
K_b	Konstanta equilibrium ionisasi kedua H_2O dengan carbamate (kmol m^{-3})

M_B	Berat molekul pelarut (kg mol^{-1})
M_w	Berat molekul air (kg mol^{-1})
P_A	Tekanan parsial CO_2 (Pa)
P_{Ai}	Tekanan parsial CO_2 pada <i>interface</i> (Pa)
q	Laju absorpsi total (kmol det^{-1})
Q	Jumlah gas yang terabsorpsi (kmol m^{-2})
r_{ov}	Kecepatan reaksi overall ($\text{kmol m}^3 \text{det}$)
R	Konstanta gas ($\text{m}^3 \text{Pa kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$)
\bar{R}	Laju absorpsi per satuan luas setelah waktu kontak t ($\text{kmol m}^{-2} \text{det}^{-1}$)
R	Kecepatan reaksi gas ($\text{kmol m}^{-3} \text{det}^{-1}$)
Re	<i>Reynold number</i>
Sc	<i>Schmidt number</i>
Sh	<i>Sherwood number</i>
t_c	Waktu kontak gas terhadap permukaan (det)
T	Temperatur (K)
U	Distribusi kecapatan film liquid (m det^{-1})
U_s	Kecepatan di permukaan film (m det^{-1})
V_A	Volume molar (liter mol^{-1})
V	Laju alir liquida ($\text{m}^3 \text{det}^{-1}$)
x	Jarak dari permukaan film cairan (m)
Zi	valensi ion

Z Koefisien mol reaktan yang bereaksi dengan 1 mol gas terlarut

Huruf Latin

δ Tebal *film* cairan (m)

ρ densitas liquida (kg m^{-3})

μ viskositas liquida ($\text{kg m}^{-1} \text{ det}^{-1}$)

φ Parameter asosiasi pelarut

Γ *Mass velocity liquid* (kg/m.s)

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Maria Hestia Intan Ciptorini dilahirkan di Tabanan yang terletak di Propinsi Bali, pada tanggal 30 April 1993, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuhnya yaitu dimulai di SDK St. Maria Immaculata Tabanan, SMPN 1 Tabanan, dan SMAN 1 Tabanan. Pada jenjang perkuliahan penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan Teknik Kimia angkatan 2011. Penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, dan selanjutnya melakukan penelitian dengan judul **“Studi Kinetika Absorpsi Karbodioksida Menggunakan Larutan Diethanolamine (DEA) Berpromotor Glycine”**

Data Pribadi Penulis

Nama	:	Maria Hestia Intan Ciptorini
Tempat Tanggal lahir	:	Tabanan, 30 April 1993
Alamat	:	Perum. Tanah Bang Permai Blok C-7 Kediri – Tabanan - Bali
Telp	:	081232561431
Email	:	maria.hestia@yahoo.com

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Kartika Arsi, penulis dilahirkan di Kota Jakarta yang terletak di Propinsi DKI Jakarta, pada tanggal 12 Januari 1994, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuhnya yaitu dimulai di SDN 03 pagi Cipayung, SMPN 09 Jakarta Timur, dan SMAN 39 Jakarta. Pada jenjang perkuliahan penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan Teknik Kimia angkatan 2011. Penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, dan selanjutnya melakukan penelitian dengan judul **“Studi Kinetika Absorpsi Karbondioksida Menggunakan Larutan Diethanolamine (DEA) Berpromotor Glycine”**

Data Pribadi Penulis

Nama	:	Kartika Arsi
Tempat Tanggal lahir	:	Jakarta, 12 Januari 1994
Alamat	:	KAV.DKI Cipayung Jl.Flora No.3
Telp	:	082219076919
Email	:	Kartikarsi@hotmail.com

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Pada masa sekarang emisi gas karbon dioksida atau CO₂ sangat diperhatikan oleh berbagai pihak, baik dari industri sampai masyarakat awam. Kenaikan emisi CO₂ dari tahun 1990 – 2011 sangat signifikan dan dapat semakin meningkat ke depannya, seperti pada gambar berikut:



Gambar 1.1 Kenaikan emisi gas CO₂

Gas CO₂ dapat merusak bagian perpipaan dan utilitas pabrik karena sifat korosivitasnya. Sifat korosif CO₂ akan muncul pada daerah dimana terdapat penurunan temperatur dan tekanan, seperti pada bagian elbow pipa, tubing, cooler dan injektor turbin. Selain itu, gas CO₂ juga dapat mengurangi nilai kalor dari gas alam. Dimana dalam fasilitas turbin, CO₂ akan mengakibatkan penurunan nilai kalor panas akibat CO₂ dan H₂O merupakan produk dari pembakaran. Pada LNG (*Liquified Natural Gas*), gas CO₂ harus dihilangkan, karena dapat membeku pada suhu rendah yang mengakibatkan penyumbatan pada system perpipaan dan

tubing pada *heat exchanger*. Pada industri amoniak, CO₂ merupakan racun pada katalis sintesa amoniak, oleh karena itu CO₂ harus dipisahkan sebelum memasuki unit sintesa amoniak (Tan, 2010).

Selain itu, penumpukan gas karbon dioksida di atmosfer dapat menimbulkan efek rumah kaca yang mengakibatkan pemanasan global. Penumpukan gas karbon dioksida di atmosfer ini sebagian besar disebabkan oleh emisi gas CO₂ dari berbagai industri akibat proses pembakaran dan proses-proses kimia lainnya. Menurut UNEP (2005), konsentrasi keseluruhan gas karbon dioksida di atmosfer selalu bertambah. Pada tahun 1860 konsentrasi gas karbon dioksida mendekati 280 ppmv, tahun 1958 mendekati 316 ppmv, dan tahun 2011 dengan cepat mencapai nilai 369 ppmv. Dan diprediksi konsentrasi akan terus meningkat hingga di atas 750 ppmv hingga tahun 2100 jika tidak ada upaya mengatasi kerugian yang ditimbulkan oleh gas karbon dioksida. *Carbon capture and storage* (CCS) merupakan salah satu upaya untuk mengatasi emisi gas karbon dioksida dari industri, mulai dari pemisahan karbondioksida, transportasi dan penyimpanannya (IPCC, 2005; Wang, dkk 2011).

Melihat besarnya kerugian yang dapat ditimbulkan oleh gas karbon dioksida, maka penting dilakukan proses pemisahan gas karbon dioksida dari aliran gas. Rao dan Rubin (2002), mengemukakan ada beberapa teknologi untuk memisahkan dan menangkap karbon dioksida seperti : proses absorpsi secara fisik dan kimia, proses adsorpsi, proses *cryogenic* (pendinginan), teknologi membran dan menggunakan sistem alga atau mikroba. Teknologi pemisahan karbon dioksida yang ekonomis, telah dikembangkan dengan baik dan telah diaplikasikan pada berbagai proses komersial adalah proses absorpsi secara kimia.

Proses absorpsi kimia merupakan proses pemisahan gas menggunakan pelarut dengan reaktan yang dapat bereaksi dengan komponen gas yang terlarut dan sering dijumpai dalam dunia industri, seperti pada industri amoniak, *petroleum chemical plants*, dan gas alam. Tujuan dari proses absorpsi dalam industri adalah untuk memisahkan komponen dari campuran gas atau untuk menghasilkan suatu produk reaksi, dan salah satu komponen dari campuran gas yang sering dipisahkan adalah gas karbon dioksida (CO_2). Penggunaan pelarut kimia dimaksudkan untuk meningkatkan pelarut dalam menyerap gas karbon dioksida. Beberapa jenis pelarut yang sering digunakan adalah pelarut organik seperti sulfinol; kalium karbonat (K_2CO_3); dan senyawa alkanolamine seperti monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA), diisopropanolamine (DIPA), diglycolamine (DGA), triethanolamine (TEA), methyldiethanolamine (MDEA), 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) dan 2-piperidineetanol (2-PE).

Keunggulan dari pelarut alkanolamine dalam menyerap gas karbon dioksida adalah laju absorpsi cepat dan biaya pelarut murah. Namun terdapat beberapa kelemahan senyawa amine seperti panas absorpsi tinggi, tidak dapat memisahkan senyawa-senyawa mercaptan, konsumsi energi untuk regenerasi pelarut cukup tinggi, dan bersifat korosif.

Pada penelitian ini digunakan larutan *Diethanolamine* (DEA) dengan promotor *Glycine* (GLY). Larutan DEA yang merupakan amine sekunder, digunakan karena memiliki beberapa keuntungan yaitu memiliki kecepatan reaksi dengan karbon dioksida yang lebih cepat dibanding MDEA serta lebih tidak mudah terurai dibanding MEA. Namun larutan DEA ini memiliki kekurangan yaitu membutuhkan energi yang cukup besar untuk meregenerasi, dapat terdegradasi karena oksigen dan memiliki volatilitas yang

tinggi. Maka dari itu digunakan *glycine* (GLY) sebagai promotor. Penggunaan *glycine* ini karena memiliki penampakan seperti air (tidak *volatile*, viskositas dan *surface tension* yang mirip dengan air), mempunyai stabilitas tinggi terhadap oksigen sehingga tidak mudah terdegradasi oleh oksigen serta memiliki kecepatan reaksi dengan karbon dioksida yang tinggi pula dan dapat menaikkan laju reaksi DEA tanpa menghilangkan keuntungan dari penggunaan larutan DEA itu sendiri (Portugal dkk, 2008).

Adapun beberapa penelitian-penelitian terdahulu yang mengkaji kinetika reaksi absorpsi kedalam larutan K_2CO_3 dengan berbagai jenis promotor diantaranya yang telah dilakukan Blauwhoff (1983) yang melakukan penelitian tentang studi reaksi antara CO_2 dan alkanolamine dalam *aqueous solution* yang mendapatkan bahwa DEA dan *diisopropylamine* (DIPA) masing-masing sangat cocok sebagai absorben untuk gas CO_2 . Penelitian ini juga mendapatkan persamaan kecepatan reaksi untuk sistem ini. Yih dan Sun (1986) mempelajari absorpsi hidrogen sulfida dan karbon dioksida dalam larutan kalium karbonat dengan atau tanpa promotor amine (DEA dan DIPA) masing-masing pada suhu $22-80^{\circ}C$ menggunakan peralatan *wetted wall column*.

Lin (1999) mempelajari tentang karakteristik performa dan modeling dari absorpsi CO_2 oleh amine dalam packed kolom. Penelitian lain juga telah dilakukan oleh Brouwer (2005) mengenai *Amino-acid Salt* untuk menangkap CO_2 dari flue gas dimana larutan *amino acid salt* dapat secara baik digunakan untuk menngkap CO_2 karena memiliki resitensi yang baik terhadap oksigen dan kinetika reaksi yang cepat.

Penelitian yang dilakukan oleh Xu dkk, (2003) melakukan penelitian mengenai absorpsi gas CO_2 dalam larutan MDEA dengan menambahkan Piperazine (PZ) dan DEA. Hasil penelitian ini menunjukan *activation effect* dari masing-masing campuran

baik DEA, PZ, maupun PZ+DEA dalam proses absorpsi CO₂ ini dihasilkan dari hasil variasi rate CO₂, transport PZ dan DEA menuju MDEA, serta *regeneration rate* dari PZ dan DEA.

Aronu (2010) telah melakukan penelitian untuk menginvestigasi *amine amino acid salt* (AAAS) untuk absorpsi CO₂ dan mendapat kesimpulan bahwa performa *amine amino acid salt* hampir sama dengan *monoethanolamine* (MEA) dalam kemampuan mengabsorpsi CO₂.

Rowland (2011) menggunakan *glycine* sebagai salah satu aktivator absorpsi CO₂, menjelaskan bahwa tingkat penyerapan CO₂ dengan *glycine* meningkat dan memiliki reaksi dengan CO₂ yang lebih cepat daripada amonia. Dikarenakan *glycine*, suatu asam amino, mampu membentuk karbamat dan juga menerima proton. Dan *glycine* juga merupakan golongan senyawa amine primer yang mempunyai kemampuan absorpsi CO₂ lebih baik dibanding dengan TEA yang merupakan golongan senyawa amine tersier (Ullmann, 2005). Serta *glycine* memiliki daya tahan pada suhu tinggi yang baik sehingga tidak mudah terdegradasi oleh panas.

I.2 Perumusan Masalah

Penelitian – penelitian sebelumnya mengenai absorpsi CO₂ dan konstanta kinetika reaksi telah banyak dilakukan, baik menggunakan absorben larutan DEA maupun karbonat dengan beberapa promotor, seperti MDEA, MEA, asam borat, dan *piperazine*, tetapi penentuan kinetika reaksi dengan promotor senyawa amine seperti *glycine* untuk larutan DEA masih belum pernah dilakukan, sehingga pada penelitian ini dilakukan penelitian absorpsi CO₂ dalam larutan DEA menggunakan promotor tersebut pada peralatan *wetted wall column* skala laboratorium pada tekanan 1 atmosfer.

Selain itu perlu dikaji secara teoritis kinerja *packed column* untuk absorpsi CO₂ menggunakan pelarut DEA dengan promotor *glycine*.

I.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan data kinetika reaksi absorpsi CO₂ dalam larutan DEA dengan promotor *glycine* pada kondisi operasi 1 atm dan suhu 303,15 – 328,15 K.

I.4 Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi data kinetika reaksi sebagai upaya untuk mengoptimalkan proses pemisahan karbon dioksida di dunia industri.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Bahan Baku (Karbon Dioksida)

Karbon dioksida adalah senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon. Berbentuk gas pada temperatur dan tekanan standar dan berada di atmosfer. Karbon dioksida termasuk oksida asam dan tidak berbentuk cair pada tekanan dibawah 5,1 atm tetapi berbentuk padat pada temperatur di bawah -78°C . Dalam bentuk padat, karbon dioksida disebut *dry ice*. Larutan karbon dioksida mengubah warna laksus dari biru menjadi merah muda (Septiawan, 2011).

Gas karbon dioksida di produksi hampir 97% dari hasil pembakaran bahan bakar fosil, seperti dari sumber batu bara, minyak, gas alam dan biomassa. Keberadaan karbon dioksida pada industri gas alam dapat menurunkan nilai *heating value* pada gas dan komponen asam dapat menyebabkan korosi pada peralatan. Pada pipa gas alam, kandungan karbon dioksida yang diizinkan sekitar 1-2% mol (Buckingham, 1964; Ma'mun, 2005).

Adanya karbon dioksida yang berlebihan dapat melubangi lapisan ozon, menyebabkan efek rumah kaca, dan pemanasan global. Salah satu indikator yang digunakan dalam menganalisa isu pemanasan global adalah bertambahnya gas rumah kaca, terutama gas karbon dioksida. Gas karbon dioksida yang keluar meninggalkan kolom harus memenuhi spesifikasi batas gas karbon dioksida, seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi Batas Konsentrasi Gas Karbon Dioksida dalam Proses Industri

Proses	Batas konsentrasi gas karbon dioksida
--------	---------------------------------------

Industri manufaktur	< 0,1% CO ₂
Industri amoniak	< 16 ppm CO ₂
Pemurnian gas alam :	
• Pipa gas	< 1% CO ₂
• Bahan baku LNG	< 50 ppm CO ₂
Sintesa gas untuk produksi kimia (H ₂ /CO)	< 500 ppm CO ₂
Gasifikasi batu bara	~500 ppm CO ₂
Industri etilen	~1 ppm CO ₂
Pembangkit tenaga listrik :	
• Pembangkit tenaga listrik NGCC	<0,5% CO ₂
• Pembangkit listrik batubara	<1,5% CO ₂

(Yildirim dkk, 2012)

Sejauh ini, berbagai upaya telah dilakukan untuk mengurangi dampak pemanasan global, seperti program penanaman kembali (reboisasi), penghematan energi, penggunaan energi baru dan terbarukan, dan pemanfaatan berbagai teknologi *carbon capture and storage* (CCS).

Carbon capture and storage (CCS) memungkinkan emisi karbon dioksida untuk dibersihkan dari aliran buangan pembakaran batu bara atau pembentukan gas dan dibuang sedemikian sehingga karbon dioksida tidak masuk ke atmosfer. Teknologi yang memungkinkan penangkapan karbon dioksida dari aliran emisi telah digunakan untuk menghasilkan karbon dioksida murni dalam industri makanan dan kimia. Setelah karbon dioksida ditangkap, penting bahwa karbon dioksida dapat disimpan secara aman dan permanen (Septiawan, 2011).

Selain memiliki beberapa efek negatif, karbon dioksida juga memiliki nilai ekonomis, diantaranya karbon dioksida digunakan dalam industri minuman berkarbonasi, *dry ice*, bahan baku pada industri urea, industri abu soda (Rao dan Rubin, 2002; Suda dkk, 1997).

II.2 Metode Pemisahan Karbon Dioksida

Rao dan Rubin (2002), mengungkapkan ada beberapa teknologi untuk memisahkan dan menangkap karbon dioksida seperti : proses *cryogenic* (pendinginan), teknologi membran, menggunakan sistem alga atau mikroba, adsorbsi, dan absorpsi.

Adsorbsi adalah proses pemisahan fluida (cairan maupun gas) yang terikat pada zat penyerap (adsorben) padatan dan akhirnya membentuk suatu *film* (lapisan tipis) pada permukaan padatan. Adsorben yang sering diaplikasikan pada proses penangkapan karbon dioksida adalah karbon aktif, alumina, dan zeolit. Proses adsorbsi jarang diaplikasikan pada proses gas buang karbondioksida, karena mempertimbangkan tantangan ketersediaan adsorben yang digunakan, selain itu selektivitas yang rendah akan berpengaruh pada pemisahan karbon dioksida dari aliran gas.

Membran merupakan metode pemisahan yang tidak membutuhkan zat kimia tambahan dan juga kebutuhan energinya sangat minimum. Membran dapat bertindak sebagai *filter* atau perangkat penghubung antara aliran gas dan cairan. Komponen-komponen akan terpisah berdasarkan ukuran dan bentuknya, dengan bantuan tekanan dan selutup *semi-permeable*. Hasil pemisahan berupa *retentate* (bagian dari campuran yang tidak melewati membran) dan *permeate* (bagian dari campuran yang melewati membran). Sehingga hanya molekul-molekul dengan ukuran tertentu saja yang bisa melewati membran sedangkan sisanya akan tertahan di permukaan membran. Efisiensi pemisahan teknologi membran tergantung pada tekanan parsial gas karbon dioksida. Dengan demikian, teknologi pemisahan menggunakan membran cocok untuk konsentrasi gas karbon

dioksida yang tinggi (di atas 20 vol%) seperti aliran gas buang dari proses *oxyfuel* dan *integrated gasification combined cycle* (IGCC).

Metode absorpsi adalah metode pemisahan yang paling ekonomis untuk memisahkan karbon dioksida dari aliran gas, sehingga pada penelitian kali ini yang digunakan ialah dengan metode absorpsi. Absorpsi karbon dioksida dengan larutan kimia atau fisika adalah teknologi yang dikembangkan dengan baik dan telah diaplikasikan pada berbagai proses komersial, termasuk pemurnian gas dan produksi amoniak. (Wang dkk, 2011).

Secara umum, proses absorpsi diawali dengan penyerapan gas ke dalam liquida melalui interface. Dikenal dua macam absorpsi, yaitu :

1. Absorpsi fisik

Proses absorpsi atau perpindahan gas (difusi) kedalam absorben tanpa disertai dengan reaksi kimia.

2. Absorpsi kimia

Pada proses ini, perpindahan gas (difusi) disertai dengan reaksi antara gas dan absorben. Reaksi kimia dapat terjadi secara *reversible* dan *irreversible* dengan reaksi orde satu, orde dua dan seterusnya tergantung dari jumlah molekul yang bereaksi yang konsentrasiannya berubah sebagai hasil dari reaksi kimia.

Absorpsi disertai dengan reaksi kimia telah mendapatkan perhatian yang serius dalam proses industry kimia. Proses absorpsireaktif (*Reactive Absorption Processes/ RAP*) adalah proses yang menggabungkan mekanisme reaks ikimia dan absorpsi dalam satu unit. Secara umum,absorpsi reaktif dikenal sebagai penyerapan gas dalam medium *liquid* dengan reaksi kimia. Proses tersebut memiliki beberapa keuntungan, dimana dalam proses tersebut dapat meningkatkan *yield* reaksi dan

selectivity, mengatasi hambatan thermodinamika seperti reduksi dalam konsumsi energy, air dan pelarut. Oleh karena adanya interaksi antara reaksi kimia dan perpindahan massa dan panas yang cukup kompleks (Gorak, 2005).

Perpindahan massa disertai reaksi kimia terjadi bila dua fasa tak berada dalam kesetimbangan kimia dikontakkan satu sama lain. Fenomena ini terdiri atas beberapa tahap elementer berikut:

- a. Difusi satu reaktan dari badan gas ke bidang batas antar fasa gas-liquida.
- b. Difusi reaktan dari interface ke badan fasa liquida.
- c. Reaksi kimia di dalam fasa liquida.
- d. Difusi reaktan yang semula ada di dalam badan fasa liquida, dan/atau produk reaksi didalam fasa liquida, akibat gradien konsentrasi yang terbentuk oleh reaksi kimia.

Proses perpindahan massa perlu disertai reaksi kimia untuk meningkatkan laju dan yield proses. Model-model perpindahan massa yang dijelaskan di muka dapat digunakan untuk mempelajari pengaruh reaksi kimia terhadap proses absorpsi. Kendatipun model-model tersebut bervariasi dalam menyajikan proses yang terjadi, seluruh model ini pada umumnya memberikan hasil perhitungan matematik yang bermanfaat dan umumnya lebih disukai untuk menggunakan model yang paling sederhana untuk suatu persoalan tertentu dari pada model yang paling realistik tapi kompleks.

II.3 Pemilihan Pelarut

Pemilihan pelarut umumnya dilakukan sesuai dengan tujuan absorpsi, antara lain :

1. Jika tujuan utama adalah untuk menghasilkan larutan yang spesifik, maka pelarut ditentukan berdasarkan sifat dari produk

2. Jika tujuan utama adalah untuk menghilangkan kandungan tertentu dari gas, maka ada banyak pilihan pelarut. Misalnya air, dimana merupakan pelarut yang paling murah dan sangat kuat untuk senyawa polar.

Terdapat beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan jenis pelarut, yaitu kelarutan gas, volatilitas, korosifitas, harga, ketersediaan, viskositas dll (Firdaus, 2011).

Pelarut alkanolamine telah digunakan sekitar 75 tahun untuk treatment industri gas (Booth, 2005; Wang dkk, 2011). Alkanolamine dapat diklasifikasikan menjadi tiga berdasarkan struktur kimianya, yaitu *primary amine*, *secondary amine* dan *tertiary amine*. *Primary amine* memiliki satu rantai alkanol dan dua atom hidrogen yang terikat atom nitrogen, contohnya adalah methylethanolamine (MEA). *Secondary amine* memiliki dua rantai atom alkanol dan satu atom hidrogen yang terikat atom nitrogen, contohnya adalah diethanolamine (DEA) dan triethanolamine (TEA). *Tertiary amine* tidak memiliki atom hidrogen, secara langsung terikat atom nitrogen, contohnya adalah methyltriethanolamine (MDEA) (Wang dkk, 2011; Yildirim dkk, 2012).

Keunggulan senyawa alkanolamine dalam menyerap gas karbon dioksida adalah laju absorpsi cepat dan biaya pelarut murah. Namun terdapat beberapa kelemahan senyawa amine seperti panas absorpsi tinggi, tidak dapat memisahkan senyawa-senyawa mercaptan, konsumsi energi untuk regenerasi pelarut cukup tinggi, dan bersifat korosif.

Perbedaan antara pelarut dan promotor, yaitu pelarut adalah suatu substansi yang dapat melarutkan bahan lain (*solute*) dengan menghasilkan suatu larutan (campuran *solvent* dan *solute*), sedangkan promotor adalah suatu bahan yang ditambahkan sebagai katalis untuk meningkatkan aktivitas reaksi atau

menambah selektivitas dari suatu pelarut. Biasanya pelarut memiliki kuantitas lebih besar dibanding dengan promotor dalam satu komponen.

Baru-baru ini asam amino telah diselidiki sebagai promotor karena memiliki kelompok gugus fungsional yang sama seperti amine dan dengan laju reaksi yang sama pula. Namun asam amino tahan terhadap degradasi oksidatif, bersifat non-volatile dan memiliki toksisitas yang rendah. Dalam larutan *aqueous*, asam amino terbentuk menjadi di tiga bentuk: asam, *zwitterionic* dan basa (atau bentuk terdeprotonasinya). Sebagai asam dan *zwitterionic*, asam amino kurang reaktif dengan CO₂, sedangkan bentuk terdeprotonasi dari asam amino lebih reaktif dan lebih disukai untuk penyerapan CO₂. Biaya asam amino seperti *glycine* juga sebanding dengan promotor tradisional seperti piperazine dan glisin sekitar dua kali biaya DEA. (Smith & Lee, 2014)

Pada penelitian ini digunakan larutan *Diethanolamine* (DEA) dengan promotor *Glycine* (GLY). Larutan DEA yang merupakan amine sekunder, digunakan karena memiliki beberapa keuntungan yaitu memiliki kecepatan reaksi dengan karbon dioksida yang lebih cepat dibanding MDEA serta lebih tidak mudah terurai dibanding MEA. Namun larutan DEA ini memiliki kekurangan yaitu membutuhkan energi yang cukup besar untuk meregenerasi, dapat terdegradasi karena oksigen dan memiliki volatilitas yang tinggi. Maka dari itu digunakan *glycine* (GLY) sebagai promotor. Penggunaan *glycine* ini karena memiliki penampakan seperti air (tidak *volatile*, viskositas dan *surface tension* yang mirip dengan air), mempunyai stabilitas tinggi terhadap oksigen sehingga tidak mudah terdegradasi oleh oksigen serta memiliki kecepatan reaksi dengan karbon dioksida yang tinggi pula dan dapat menaikkan laju reaksi DEA tanpa menghilangkan keuntungan dari penggunaan larutan DEA itu sendiri (Portugal dkk, 2008).

II.4 Kinetika Reaksi Absorpsi Karbon Dioksida

1. Ketika karbon dioksida terserap dalam larutan *diethanolamine* (DEA), maka akan terjadi reaksi stokimetri sebagai berikut (Yi dkk, 2009) :



Di dalam larutan terjadi reaksi-reaksi kesetimbangan sebagai berikut :



Dimana :

$$K_c = \frac{[\text{R}_2\text{NH}]^2 [\text{CO}_2]}{[\text{R}_2\text{NCOO}^-][\text{R}_2\text{NH}_2^+]}; \quad K_{eq} = \frac{[\text{R}_2\text{NH}][\text{HCO}_3^-]}{[\text{R}_2\text{NCOO}^-]};$$

$$K_b = \frac{[\text{R}_2\text{NH}][\text{H}^+]}{[\text{R}_2\text{NH}_2^+]}; \quad K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-];$$

$$K_1 = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{[\text{CO}_2]} \text{ dan } K_2 = \frac{[\text{CO}_3^{2-}][\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]}$$

2. Dari reaksi kesetimbangan diatas, dapat ditentukan nilai dari $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ sebagai berikut (Yi dkk, 2009; Mahajani dan Dackwerts, 1982):

$$[\text{OH}^-] = \frac{K_w}{K_2} \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} \quad (2.8)$$

$$[\text{CO}_2]_e = \frac{K_c K_2}{K_{eq} K_1} \frac{[\text{HCO}_3^{2-}]^2}{[\text{CO}_3^{2-}]} \quad (2.9)$$

3. Nilai K_w , K_1 dan K_2 didapat dari persamaan berikut :

$$K_w = \exp\left(39,555 - \frac{9,879 \times 10^4}{T} + \frac{5,6883 \times 10^7}{T^2} - \frac{1,465 \times 10^{10}}{T^3} + \frac{1,3615 \times 10^{12}}{T^4}\right) \quad (2.10)$$

(Yi dkk, 2009; Kent dan Elsenberg, 1976)

$$\log K_1 = -\frac{3404,7}{T} + 14,843 - 0,03279T \quad (2.11)$$

(Yi dkk, 2009; Danckwerts dan Sharma, 1966)

$$K_2 = \exp\left(-294,74 + \frac{3,6439 \times 10^5}{T} - \frac{1,8416 \times 10^8}{T^2} + \frac{4,1579 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{3,5429 \times 10^{12}}{T^4}\right) \quad (2.12)$$

(Yi dkk, 2009; Kent dan Elsenberg, 1976)

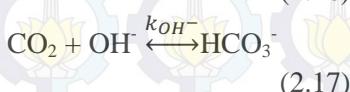
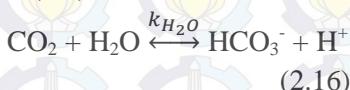
$$K_{DEA} = 10^{\left(\frac{-2274,5}{T} + 10,4493\right)} x [DEA] \quad (2.13)$$

(Blauwhoff, 1983)

$$K_b = \exp(-3071.15/T + 6.77 \ln T + (-48.76)) \quad (2.14)$$

$$K_{eq} = \exp\left(-\frac{17067.2}{T} + (-66.8 \ln T) + 439.71\right) \quad (2.15)$$

4. Langkah – langkah reaksi yang menentukan laju reaksi untuk reaksi (2.1) adalah :



5. Pada larutan yang memiliki $\text{pH} > 8$, reaksi (2.16) dapat diabaikan, dan reaksi (2.17) yang lebih dominan dan sebagai laju reaksi pembatas (*rate limiting reaction*). Sehingga persamaan laju reaksinya adalah :

$$r_{CO_2-OH^-} = k_{OH^-}[OH^-][CO_2] \quad (2.18)$$

$$\log_{10} k_{OH^-} = 13,635 - \frac{2895}{T(K)} \quad (2.19)$$

6. Persamaan laju reaksi *overall* (r_{ov}) dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$r_{ov} = k_{ov} [CO_2] \quad (2.20)$$

dimana k_{ov} adalah konstanta kecepatan reaksi *overall pseudo first order*

$$k_{ov} = k_{OH^-}[OH^-] + k_{amine}[Amine] + k_{catalyst}[Catalyst] \quad (2.21)$$

$$k_{app} = k_{catalyst}[Catalyst] \quad (2.22)$$

sehingga persamaan (2.22) menjadi :

$$k_{app} = k_{ov} - k_{OH^-}[OH^-] - k_{amine}[Amine] \quad (2.23)$$

7. Kondisi reaksi pada absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine* berpromotor campuran umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai bilangan Hatta adalah $3 < Ha < \frac{1}{2} E_i$, dimana (Lin dkk, 2009):

$$Ha = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L} \quad (2.24)$$

Untuk $Ha > 3$, laju absorpsi karbon dioksida adalah (Danckwerts, 1970; Lin dkk , 2009):

$$\bar{R} = (C_{Ai} - C_{Ae})\sqrt{D_{AL} k_{ov}} \quad (2.25)$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{C_{B0}}{z C_{Ai}} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad (2.26)$$

II.5 Absorpsi Karbon Dioksida dalam *Wetted Wall Column*

Wetted wall column merupakan kolom yang terdiri dari tabung silinder tegak dimana cairan dimasukkan dari bagian atas

dan mengalir sepanjang dinding tabung berupa lapisan tipis (*film*) kemudian keluar pada bagian bawah tabung, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.1. Udara dialirkan dari bagian bawah dan keluar dari bagian atas silinder. Ketika *film* telah mencapai kecepatan akhir distribusinya kecepatan v pada ketinggian x di bawah permukaan adalah (Altway, 2009).

$$U(x) = \frac{3}{2} \left(\frac{v}{\pi d} \right)^{2/3} \left(\frac{gp}{3\mu} \right)^{1/3} \left(1 - x^2 \left[\frac{\pi g d \rho}{3 \mu v} \right]^{2/3} \right) \quad (2.27)$$

Dimana: U = kecepatan film cairan, v = laju alir volumetrik cairan, d = diameter pipa yang dialiri cairan, g = percepatan gravitasi, ρ = densitas cairan, μ = viskositas cairan

Kecepatan U adalah 0 pada permukaan dinding pipa, dimana $x = \delta$ (δ = tebal *film*), maka

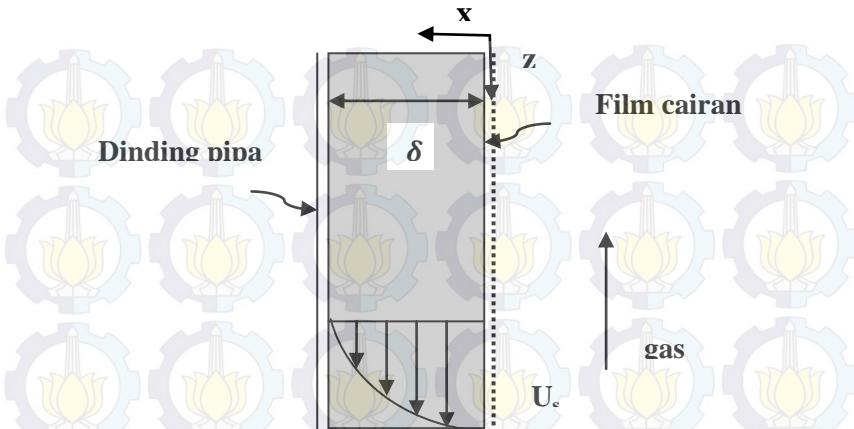
$$\delta = \left[\frac{3\mu v}{\pi g d \rho} \right]^{1/3} \quad (2.28)$$

Sehingga persamaan (2.33) dapat dituliskan:

$$U = U_s (1 - x^2 / \delta^2) \quad (2.29)$$

Kecepatan U_s pada permukaan ($x = 0$) adalah

$$U_s = \frac{3}{2} \left(\frac{v}{\pi d} \right)^{2/3} \left(\frac{gp}{3\mu} \right)^{1/3} \quad (2.30)$$



Gambar 2.1 Distribusi kecepatan *Wetted Wall Column*

Dan jika tinggi kolom adalah h dan reaksi dianggap di daerah dekat permukaan, maka waktu kontak gas terhadap permukaan *film* adalah :

$$t = \frac{h}{U_s} = \frac{2h}{3} \left[\frac{3\mu}{gp} \right]^{1/3} \left[\frac{\pi d}{v} \right]^{2/3}$$

(2.31)

Bila $Q_{(t)}$ adalah jumlah gas yang terserap per satuan luas permukaan selama waktu kontak (t), maka laju absorpsi rata-rata selama waktu t adalah $Q_{(t)}/t$. *Film* dianggap sangat tipis, maka area total permukaan yang terbuka sama dengan permukaan pipa sebesar πdh , laju total absorpsi (q) ke dalam *film* menjadi :

$$\frac{Q_{(t)}}{t} = \frac{q}{\pi dh}$$

(2.32)

Laju absorpsi (q) dapat dihitung secara eksperimen, dan $Q_{(t)}$ dihitung dari persamaan (2.32), t dihitung dari persamaan (2.31) dan dapat diubah – ubah dengan merubah laju alir (v) atau tinggi

kolom (h). Jadi $Q(t)$ dapat ditentukan sebagai fungsi waktu (t) (Altway, 2009).

II.6 Regim Reaksi

Di dalam *film* atau lapisan batas cairan terjadi kompetisi antara reaksi dan difusi. Berdasarkan kecepatan relatif antara reaksi dan difusi, maka dapat diklasifikasikan beberapa regim-regim reaksi yaitu :

- reaksi sangat lambat
- reaksi lambat
- reaksi cepat, reaksi sangat cepat dan reaksi spontan

Klasifikasi regim-regim reaksi ini digunakan bilangan hatta yang pada dasarnya merupakan perbandingan antara laju reaksi terhadap laju difusi. Jadi harga bilangan hatta yang besar menunjukkan reaksi yang cepat, sangat cepat atau spontan. Harga bilangan hatta yang kecil menunjukkan reaksi yang lambat atau sangat lambat.

1. Regim reaksi sangat lambat

Dalam hal ini reaksi sangat lambat dibandingkan kecepatan difusi. Regim ini dipenuhi bila $Ha < 0,02$. Bila target proses adalah untuk absorpsi gas, maka dapat dianggap bahwa tak terjadi reaksi di dalam *film* maupun di dalam badan *liquid*. Reaksi sama sekali tak mempengaruhi laju absorpsi. Jadi laju absorpsi gas dengan reaksi sangat lambat sama dengan laju absorpsi fisik (tanpa reaksi). Bila target proses adalah untuk terjadinya reaksi maka proses ini dikendalikan dengan reaksi kimia, dan laju proses sama dengan laju reaksi.

2. Regim reaksi lambat

Pada regim ini, tak terjadi reaksi di dalam *film*, berarti *enhancement factor* sama dengan satu. Tapi ada reaksi di dalam badan cairan. Sehingga laju absorpsi masih dipercepat

dengan adanya reaksi ini karena konsentrasi gas terlarut di dalam badan cairan menurun dengan adanya reaksi sehingga konsentrasi *driving force* meningkat dan laju absorpsi juga meningkat. Regim ini dipenuhi bila $0,02 < Ha < 0,5$.

3. Regim reaksi cepat

Pada regim ini terjadi reaksi di dalam *film* tapi tak terjadi reaksi di dalam badan cairan. Regim ini dipenuhi bila $Ha > 2$. Untuk reaksi *irreversible*, konsentrasi gas terlarut di dalam badan cairan bisa dianggap nol.

(Danckwerts, 1970; Altway, 2009)

II.7 Kelarutan Gas dalam Cairan

Pada proses perpindahan massa gas – cair, dianggap terjadi kesetimbangan uap – cair untuk gas yang diserap pada bidang batas gas – cair. Dalam hal ini, konsentrasi suatu gas pada bidang batas ini sama dengan kelarutannya pada tekanan yang ada pada permukaan cairan. Kelarutan gas dalam cairan dapat ditentukan menggunakan Hukum Henry, seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$P_A = He C_{Ai} \quad (2.33)$$

dengan He adalah konstanta Henry yang nilainya dapat diperoleh dari literatur, dan P_A adalah tekanan parsial gas A dalam fasa gas. Harga He yang ada di literatur adalah untuk sistem gas-cair. Untuk gas yang terlarut dalam suatu larutan elektrolit, harga konstanta Henry di dapat dari persamaan :

$$\log(He/He^0) = h I \quad (2.34)$$

dimana He^0 adalah konstanta Henry untuk sistem gas-cair dan I adalah kekuatan ionik dari larutan yang diperoleh dari :

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2 \quad (2.35)$$

C_i adalah konsentrasi ion – ion yang valensinya Z_i . Besaran h di dapat dari :

$$h = h_+ + h_- + h_G \quad (2.36)$$

Di dalam campuran elektrolit, harga He dapat diperoleh dari:

$$\log(He/He^0) = h_1 I_1 + h_2 I_2 \quad (2.37)$$

dimana I_1 adalah kekutan ionik untuk larutan 1 dan h_1 adalah harga h untuk larutan elektrolit 1 (Danckwerts, 1970). Karena amine merupakan pelarut organik yang tidak terionisasi, maka digunakan persamaan:

$$H_{e,T}^0 = H_{e,298}^0 \exp\left(\frac{-d \ln kH}{d(1/T)} x \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right) \quad (2.38)$$

(Wiguna dan Naszaruddin, 2014)

II.8 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk referensi, seperti yang telah tercantum dalam Tabel 2.2 berikut :

Tabel 2.2 Penelitian terdahulu

No	Tahun	Nama Peneliti	Uraian
1	1983	Blauwhoff	Mempelajari reaksi antara CO ₂ dan alkanolamine dalam aqueous solution yang mendapati bahwa DEA dan diisopropylamine (DIPA) sangat cocok diterapkan dengan penurunan rumus kecepatan reaksi dari <i>the proposed mechanism</i>
2	1986	Yih dan Sun	Mempelajari absorpsi hidrogen sulfida dan karbon dioksida dalam larutan kalium karbonat dengan atau tanpa promotor amine (DEA dan DIPA) pada suhu 22-80°C menggunakan peralatan wetted wall column.
3	1988	Versteeg dan Oyevaar	Mempelajari reaksi absorpsi karbon dioksida dan DEA pada suhu 298 K.
4	1991	Glasscock dan Critchfield	Mempelajari tentang absorpsi/desorpsi karbon dioksida pada campuran larutan MDEA dengan MEA atau DEA.
5	1999	Bavbek dan Alper	Didapat mekanisme reaksi dan kinetika reaksi karbon dioksida pada alkanolamine primer dan sekunder.
6	2004	Cullinane dan Rochelle	Melakukan penambahan 0,6 M promotor piperazine dalam 20-30% berat larutan kalium karbonat pada suhu 40-80°C menggunakan peralatan <i>wetted wall column</i> .

*Lanjutan*Tabel 2.2 Penelitian terdahulu

No	Tahun	Nama Peneliti	Uraian
7	2005	Brouwer	Mempelajari amino-acid Salt untuk menangkap CO ₂ dari flue gas dimana larutan amino acid salt dapat secara baik digunakan untuk menangkap CO ₂ karena memiliki resitensi yang baik terhadap oksigen dan kinetika reaksi yang cepat.
8	2009	Portugal dkk	Melakukan model simulasi kelarutan karbon dioksida pada larutan garam asam amino menggunakan <i>stirred reactor</i> .
9	2009	Delgado dkk	Simulasi absorpsi karbon dioksida dalam larutan DEA dengan menggunakan membran <i>hollow fiber</i> sebagai kontaktor
10	2011	Siemieniec dkk	Mempelajari kinetika reaksi karbon dioksida dalam larutan diethanolamine pada temperatur 293-313 K dengan menggunakan teknik <i>stopped-flow</i> .
11	2014	Illuta dkk	Mempelajari kinetika absorpsi karbon dioksida dalam diethanolamine dengan <i>stirred cell reactor</i>
12	2014	Devries	Mempelajari absorpsi karbon dioksida dalam larutan karbonat berpromotor pada suhu yang tinggi. Promotor yang berbasis asam amino menghasilkan laju reaksi yang lebih tinggi daripada MEA.
13	2014	Wiguna dan Naszaruddin	Mempelajari model simulasi absorpsi gas karbon dioksida dalam larutan MDEA berpromotor PZ.
14	2014	Borhani	Mempelajari simulasi dan membandingkan bermacam promotor untuk absorpsi karbon dioksida dengan larutan DEA.



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Deskripsi Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menentukan data kinetika reaksi absorpsi gas karbon dioksida dalam larutan *Diethanolamine* (DEA) berpromotor *glycine* menggunakan peralatan *wetted wall column* skala laboratorium pada tekanan atmosfer dan suhu 303.15 K (30°C) – 328.15 K (55°C).

III.2 Bahan dan Peralatan Penelitian

III.2.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah :

1. Campuran gas karbon dioksida dan nitrogen (dengan komposisi CO₂ 20% dan N₂ 80%)
2. *Diethanolamine* (DEA)
3. *Glycine*
4. Asam oksalat (C₂H₂O₄)
5. Natrium hidroksida (NaOH)
6. Asam klorida (HCl)
7. Aquadest
8. Indikator phenolphthalein
9. Indikator metil orange

III.2.2 Peralatan Penelitian

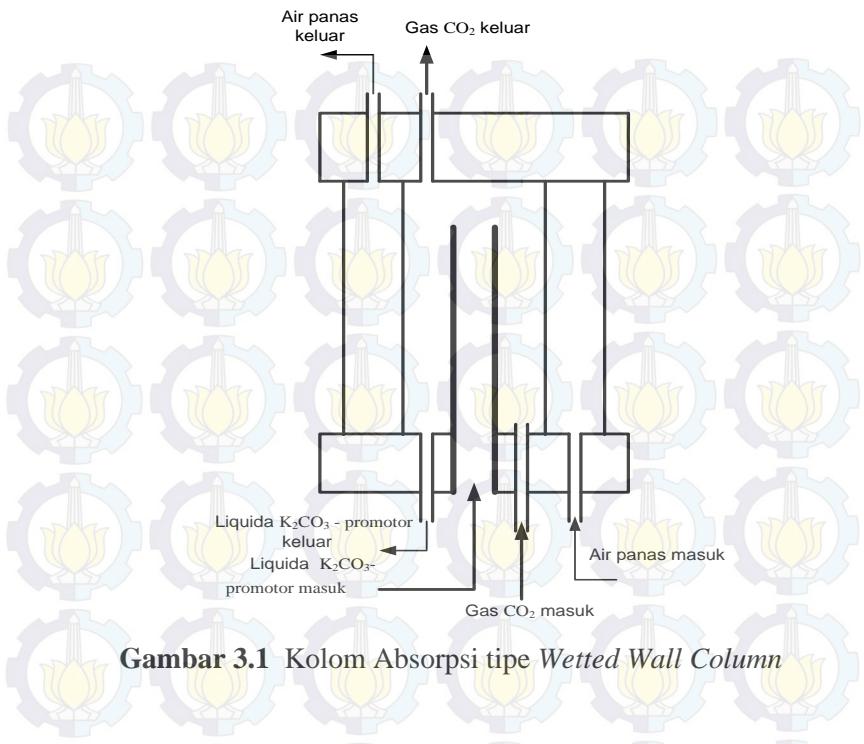
Peralatan yang digunakan pada penelitian adalah :

1. Peralatan *wetted wall column* :

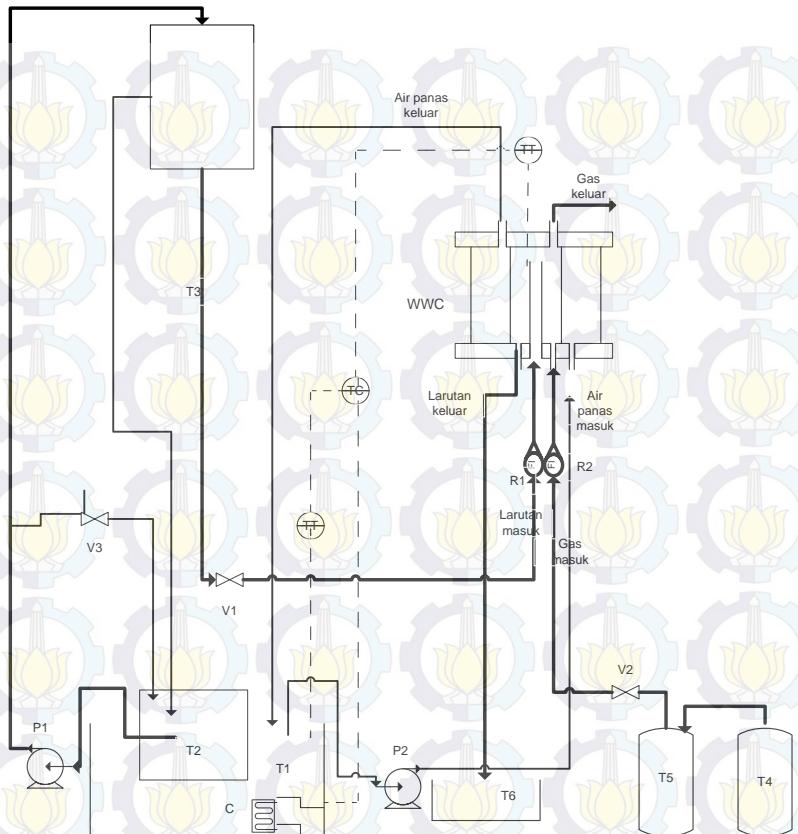
Peralatan utama yang digunakan adalah kolom absorpsi tipe *Wetted Wall Column* (WWC), seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Desain kolom WWC ini mengacu pada beberapa peneliti

sebelumnya, seperti Rochelle, (2009); Pacheco (2000); Bishnoi dan Rochelle (2000); Dang (2001); Cullinane dan Rochelle (2004); Thee, dkk (2012) yang bergerak di bidang perpindahan massa, termodinamika, dan kinetika reaksi pada proses absorpsi gas karbon dioksida dengan pelarut kalium karbonat dan atau dengan alkanolamine.

Wetted Wall Column tersusun atas dua silinder koaksial dari bahan kaca, dengan diameter dalam kaca bagian luar 8 cm dan diameter luar kaca bagian dalam 4 cm. Di bagian tengah terdapat *tube* dari bahan *stainless steel* dengan panjang 9.3 cm, diameter luar 1.3 cm dan luas permukaan kontak 37.96 cm^2 . *Tube* berfungsi sebagai saluran aliran larutan *diethanolamine* (DEA)-*glycine*. Larutan *diethanolamine* mengalir di bagian dalam *tube* kemudian *overflow* pada bagian ujung atas *tube* dan bergerak mengalir ke bawah membentuk lapisan tipis di seluruh permukaan *tube*, sedangkan aliran gas karbon dioksida mengalir dari bawah ke atas dan terjadi kontak dengan lapisan tipis larutan *diethanolamine* di seluruh permukaan luar *tube* tersebut. Sisi anulus antara kedua silinder kaca tersebut berfungsi untuk aliran pemanas dari *Water Bath Thermostat* sebagai media pengatur kestabilan temperatur sistem WWC.



Gambar 3.1 Kolom Absorpsi tipe *Wetted Wall Column*



Gambar 3.2. Skema Peralatan *Wetted Wall Column*

Keterangan gambar :

C : Koil pemanas

P1 : Pompa larutan DEA berpromotor

P2 : Pompa air

R1 : Rotameter cairan

R2 : Rotameter gas

T1	: <i>Waterbath</i>
T2	: Tangki reservoir (tangki penampung larutan DEA berpromotor)
T3	: Tangki <i>overflow</i>
T4	: Tangki gas umpan (CO_2)
T5	: Tabung saturator
T6	: Tangki sampel
TT	: <i>Thermo transmitter</i>
TC	: <i>Thermo control</i>
V1	: <i>Gate valve</i> larutan
V2	: <i>Gate valve</i> CO_2
V3	: <i>Gate valve (by pass)</i>
WWC	: <i>Wetted wall column</i>

III.3 Kondisi Operasi dan Variabel Penelitian

Kondisi operasi dan variabel penelitian yang digunakan pada penelitian adalah :

- Kondisi operasi :
 - 1. Tekanan : 1 atmosfer
 - 2. Suhu : $30, 35, 40, 45, 50, 55^{\circ}\text{C}$
- Gas umpan
 - 1. Jenis Gas umpan : campuran 20% $\text{CO}_2 + 80\% \text{ N}_2$
 - 2. Laju alir gas : 6 L/menit
- Pelarut
 - 1. Jenis pelarut : DEA
 - 2. Konsentrasi pelarut : 30% berat
 - 3. Laju alir pelarut : 200 mL/menit
- Promotor
 - 1. Jenis promotor : *glycine*

2. Konsentrasi promotor : 1-3% (% berat)
Glycine

III.4 Prosedur Penelitian

1. Tahap persiapan bahan dan peralatan penelitian

- a. Mempersiapkan bahan penelitian, seperti campuran gas karbon dioksida dan nitrogen, *diethanolamine*, *glycine*, aquadest, indikator PP, indikator MO, asam klorida, asam oksalat, natrium hidroksida.
- b. Mempersiapkan peralatan penelitian, seperti bak penampung larutan *diethanolamine*, bak penampung sampel, buret, statif, erlenmeyer, labu ukur, gelas ukur, corong kaca, pipet volume, pipet tetes.
- c. Merangkai peralatan *wetted wall column* seperti gambar 3.2
- d. Mempersiapkan peralatan titrasi yang digunakan untuk analisa larutan.

2. Tahap pelaksanaan penelitian

- a. Mengisi air ke dalam *waterbath* (T1) sebagai pengatur temperatur dalam jaket WWC
- b. Membuat larutan *diethanolamine* 30% berat
- c. Menambahkan masing-masing *glycine* (% berat) sesuai dengan variabel ke dalam larutan DEA 30% berat, dan untuk DEA murni tidak ditambahkan promotor *glycine*
- d. Memasukkan larutan DEA berpromotor ke dalam tangki *reservoir* (T2)
- e. Mengeset suhu operasi sesuai dengan variabel
- f. Mensirkulasikan air panas pada sisi anulus kolom WWC dan kembali ke *waterbath* (T1)

- g. Mensirkulasikan larutan DEA berpromotor menggunakan pompa dari tangki *reservoir* (T2) ke tangki *overflow* (T3) hingga larutan *overflow*.
- h. Mengatur laju alir larutan DEA berpromotor, sehingga larutan mengalir dari bawah ke atas melalui bagian dalam *tube* hingga terbentuk lapisan tipis pada permukaan *tube*
- i. Pada saat suhu sistem telah mencapai yang diinginkan dan aliran telah stabil, campuran gas karbon dioksida dan nitrogen dialirkan melewati tangki saturator (T5).
- j. Kemudian campuran gas karbon dioksida dan nitrogen mengalir dari bawah kolom menuju atas kolom bagian luar pipa *stainless steel* sehingga terjadi kontak antara gas karbon dioksida dan nitrogen dengan lapisan tipis cairan di seluruh permukaan luar *tube* hingga kondisi *steady state*.
- k. Apabila tercapai kondisi *steady state*, mengambil sampel larutan DEA berpromotor pada tangki penampung sampel (T6) untuk dilakukan analisa kandungan karbonat dan bikarbonat menggunakan metode titrasi menggunakan indikator *phenolphthalein* dan *metil orange*.

3. Tahap Analisa Sampel

Analisa kandungan karbonat dan bikarbonat

Analisa konsentrasi awal dan akhir kandungan karbonat dan bikarbonat dilakukan dengan metode titrasi menggunakan indikator *phenolphthalein* dan *metil orange*.

III.5 Evaluasi Data

Berdasarkan data hasil eksperimen dan beberapa literatur dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan konstanta kecepatan reaksi berpromotor dengan tahapan sebagai berikut:

- Perhitungan waktu kontak gas-cairan (Danckwerts, 1970):

$$t = \frac{h}{u_s} = \frac{2h}{3} \left[\frac{3\mu}{g\rho} \right]^{1/3} \left[\frac{\pi d}{v} \right]^{2/3} \quad (3.1)$$

- Perhitungan jumlah gas yang diserap per satuan luas permukaan selama waktu kontak (t), maka laju rata-rata absorpsi selama t adalah $Q(t)/t$ adalah (Danckwerts, 1970)

:

$$\frac{Q(t)}{t} = \frac{q}{\pi dh} \text{ dimana:}$$

$$q = v \times ([karbonat + bikarbonat]) \quad (3.2)$$

- Perhitungan $[OH^-]$ dan $[CO_2]_e$ dari reaksi kesetimbangan menggunakan persamaan (Yi dkk, 2009):

$$[OH^-] = \frac{K_w}{K_2} \frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} \quad (3.3)$$

$$[CO_2]_e = \frac{K_c K_2}{K_{eq} K_1} \frac{[HCO_3^{2-}]^2}{[CO_3^{2-}]} \quad (3.4)$$

- Nilai K_w , K_1 dan K_2 didapat dari persamaan berikut :

$$K_w = \exp \left(39,555 - \frac{9,879 \times 10^4}{T} + \frac{5,6883 \times 10^7}{T^2} - \frac{1,465 \times 10^{10}}{T^3} + \frac{1,3615 \times 10^{12}}{T^4} \right) \quad (3.5)$$

(Yi dkk, 2009)

$$\log K_1 = - \frac{3404,7}{T} + 14,843 - 0,03279T \quad (3.6)$$

(Yi dkk, 2009)

$$K_2 = \exp \left(-294,74 + \frac{3,6439 \times 10^5}{T} - \frac{1,8416 \times 10^8}{T^2} + \frac{4,1579 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{3,5429 \times 10^{12}}{T^4} \right) \quad (3.7)$$

(Yi dkk, 2009)

$$K_{DEA} = 10^{\left(\frac{-2274,5}{T} + 10,4493\right)} x [DEA] \quad (3.8)$$

(Blauwhoff, 1983)

$$K_b = \exp(-3071.15/T + 6.77 \ln T + (-48.76)) \quad (3.9)$$

$$K_{eq} = \exp \left(-\frac{17067.2}{T} + (-66.8 \ln T) + 439.71 \right) \quad (3.10)$$

- Perhitungan nilai C_{Ai} didapatkan dengan cara trial k_{ov} , menggunakan persamaan (Altway, 2009) :

$$C_{Ai} = \frac{k_g P_A + C_{Ae} \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \quad (3.11)$$

- Setelah didapatkan nilai C_{Ai} dari persamaan (3.11), maka nilai k_{ov} dapat ditentukan dari persamaan (Danckwerts, 1970):

$$\frac{Q}{t} = \bar{R} = (C_{Ai} - C_{Ae}) \sqrt{D_{AL} x k_{ov}} \quad (3.12)$$

- Menentukan nilai k_{app} dari persamaan dibawah ini :
 $k_{app} = k_{ov} - k_{OH^-} [\text{OH}^-] - k_{DEA} [\text{DEA}] \quad (3.13)$
dimana :

$$k_{app \text{ glycine}} = k_{glycine} [\text{glycine}] \quad (3.14)$$

- Harga k_{OH^-} diperoleh dari persamaan berikut (Lin dkk, 2009) :

$$\log_{10} k_{OH^-} = 13,635 - \frac{2895}{T} \quad (3.15)$$

- Konstanta laju reaksi *glycine* (k_{glycine}) merupakan fungsi temperatur yang dinyatakan dengan persamaan Arhenius:

$$k_{\text{glycine}} = A_{\text{glycine}} e^{\frac{-E}{RT}} \quad (3.16)$$

Keterangan :

1. Kondisi reaksi pada absorpsi karbon dioksida dalam larutan DEA berpromotor umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai $3 < Ha < \frac{1}{2} E_i$, dimana (Danckwerts, 1970; Lin dkk, 2009) :

$$Ha = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L} \quad (3.17)$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{C_{B0}}{z C_{Ai}} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad (3.18)$$

2. Nilai koefisien perpindahan massa sisi gas (k_g) diperoleh dari persamaan (Cullinane dan Rochelle, 2004)

$$k_g = \frac{Sh D_{AG}}{R T d} \quad (3.19)$$

Dimana,

$$Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{AG}} \quad (3.20)$$

$$Re = \frac{\rho_g v d}{\mu_g} \quad (3.21)$$

$$Sh = 1.075 (Re Sc \frac{d}{h})^{0.85} \quad (3.22)$$

3. Nilai koefisien perpindahan massa sisi cairan (k_L) diperoleh dari persamaan (Hatta dan Katori, 1934)

$$k_L = 0.422 \sqrt{\frac{D_{AL} \chi \Gamma}{\rho (B_F)^2}} \quad (3.23)$$

4. Nilai koefisien difusivitas dalam liquid diperoleh dari persamaan Wilke Chang (Wilke dan Chang, 1955) :

$$D_{AL/W} = 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_W)} \frac{T}{\mu_W V_A^{0.6}} \quad (3.24)$$

sedangkan difusivitas dalam gas diperoleh dari tabel 6.2-1 (Geankoplis 3rd edition) dan dilakukan koreksi suhu sebagai berikut :

$$\left(\frac{D_{AG,T}}{D_{AG,T_0}} \right) = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,75} \quad (3.25)$$

5. Data kelarutan di dapat dari persamaan konstanta Henry :

$$H_e^0 T = H_e^0_{298} \exp \left(\frac{-d \ln k_H}{d(1/T)} x \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) \right) \quad (3.26)$$

(Wiguna dan Nazaruddin, 2014)



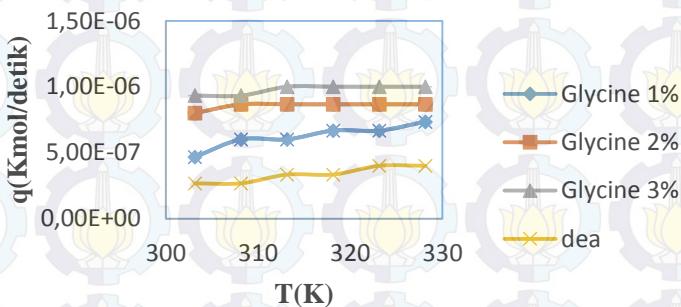
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil penelitian data kinetika reaksi absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine* (DEA) berpromotor *glycine* menggunakan peralatan *Wetted Wall Column (WWC)* dengan suhu 303.15 K hingga 328.15 K pada tekanan 1 atmosfer. Campuran gas yang digunakan terdiri dari 20% karbon dioksida dan 80% nitrogen. Sistem larutan terdiri dari sistem larutan 30% berat DEA dengan variasi penambahan konsentrasi promotor *glycine* (1-3% berat) dan juga dengan DEA murni.

IV.1 Pengaruh Kenaikan Suhu Terhadap Laju Absorpsi Karbon Dioksida

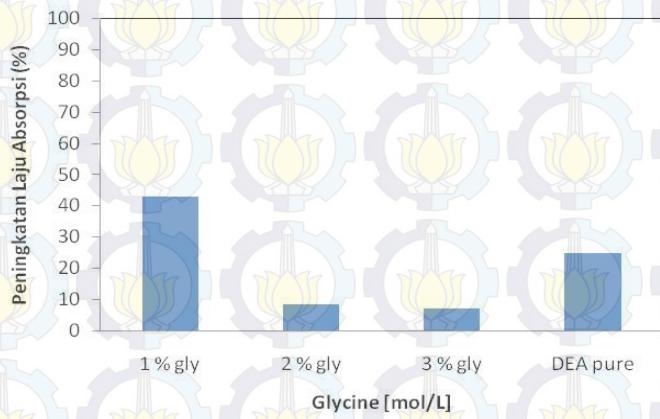


Gambar 4.1 Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine* (DEA) murni dan *diethanolamine* (DEA) berpromotor *glycine* pada suhu 303.15 K – 328.15 K

Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absorpsi karbon dioksida ditunjukkan pada **Gambar 4.1**, dimana laju absorpsi

karbon dioksida cenderung meningkat seiring dengan peningkatan suhu pada konsentrasi *glycine* 1% berat. Peningkatan laju absorpsi ini disebabkan karena semakin meningkatnya suhu, maka energi kinetik molekul-molekul zat yang bereaksi akan bertambah sehingga reaksi yang terjadi akan semakin cepat serta dengan kenaikan suhu difusifitas menjadi meningkat (Lin, 2009). Sedangkan pada konsentrasi *glycine* 2% berat dan 3% berat cenderung stabil pada suhu 313,15 K ke atas. Hal ini dikarenakan reaksi absorpsi berlangsung terlalu cepat sehingga pengaruh kinetika reaksi tidak terlalu signifikan dan yang terjadi hanya perpindahan massanya secara difusi. Sehingga didapat rata-rata peningkatan laju absorpsi dari suhu pada DEA berpromotor *glycine* 1-3% dari suhu 303.15 K menjadi 328.15 K sekitar 24,2%.

IV.2 Pengaruh Konsentrasi Promotor Terhadap Laju Absorpsi Karbon Dioksida

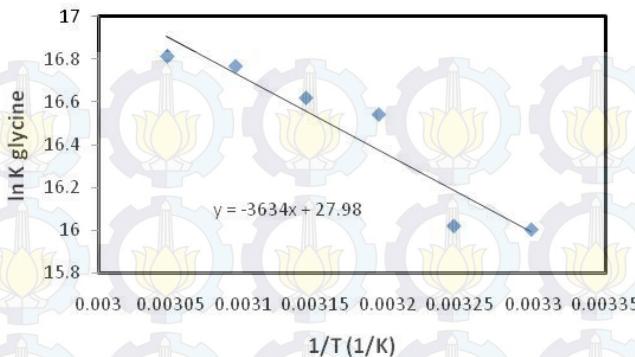


Gambar 4.2 Peningkatan laju absorpsi tiap konsentrasi promotor pada suhu 303.15 K – 328.15 K

Pada **Gambar 4.2** menunjukkan pengaruh konsentrasi promotor terhadap laju absorpsi karbon dioksida, dimana semakin besar konsentrasi promotor yang diberikan, maka semakin stabil pula laju absorpsi karbon dioksida. Peningkatan laju absorpsi untuk konsentrasi glycine 1-3% dan DEA murni masing-masing sebesar 42,86%; 8,33%; 7,14%; dan 25%. Dapat dilihat peningkatan laju absorpsi tertinggi terdapat pada glycine 1%, ini dikarenakan dengan penambahan glycine sebesar 1% masih belum cukup untuk membuat pelarut stabil seperti pada konsentrasi glycine 2 dan 3%. Sedangkan, dari **Gambar 4.1** dapat pula kita lihat bahwa terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara pelarut DEA murni dengan pelarut yang menggunakan promotor glycine, laju absorpsi antara DEA murni dengan DEA berpromotor 1% memiliki kenaikan sebesar 46,4%.

Kenaikan ini dikarenakan penambahan sejumlah promotor yang berperan sebagai katalisator akan menurunkan energi aktivasi. Dengan menurunnya energi aktivasi, maka pada suhu yang sama reaksi dapat berjalan lebih cepat dan kinetika reaksi meningkat (Thee, 2012), sehingga laju absorpsi karbon dioksida juga mengalami kenaikan. Dan ini menunjukkan bahwa promotor *glycine* sangat efektif untuk meningkatkan laju absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine*.

IV.3 Kereaktifan Promotor *Glycine* pada Absorpsi Karbon Dioksida



Gambar 4.3 Hubungan $\ln k$ vs $1/T$ pada laju absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine* berpromotor *glycine* pada suhu 303.15 K – 328.15 K

Kereaktifan *glycine* sebagai promotor dalam absorpsi karbon dioksida dapat ditentukan dari konstanta kecepatan reaksi yang dihitung dengan persamaan *Arhenius*. Pada **Gambar 4.3**, didapatkan intersept untuk *glycine* yaitu anti- $\ln A = 1.419 \times 10^{12}$ dan slope $(-E/R) = -3634$, sehingga diperoleh persamaan $k_{\text{glycine}} = 1.419 \times 10^{12} \exp(-3634/T)$. Dari hasil percobaan ini, nilai k_{ov} antara pelarut DEA murni dengan DEA berpromotor *glycine* lebih besar nilai k_{ov} berpromotor *glycine*, dapat dilihat pada **Tabel B.12** hingga **Tabel B.15**. Hal ini dikarenakan *glycine* termasuk golongan senyawa amine primer yang menurut literatur mempunyai kemampuan lebih baik dalam absorpsi karbon dioksida dibandingkan dengan DEA yang merupakan senyawa amine sekunder (Ullmann, 2005). Serta *glycine* mempunyai ketahanan terhadap panas yang baik, sehingga tidak mudah terdegradasi (Moh. Songolzadeh, 2012).

Berikut merupakan tabel perbandingan berbagai macam pelarut yang biasa digunakan dalam proses absorpsi karbon dioksida menggunakan *wetted-wall column*:

Tabel 4.1 Perbandingan Persamaan Konstanta Reaksi Absorpsi Karbon Dioksida Berbagai Macam Pelarut

Pelarut	Nilai k (L/mol.s)	Referensi
Glycine	$1,419 \times 10^{12} \exp\left(\frac{-36347}{T}\right)$	Studi ini
MEA	$9,56 \times 10^8 \exp\left(\frac{-3802,4}{T}\right)$	Aboudheir, 2006
MDEA	$2,58 \times 10^8 \exp\left(\frac{-3736,5}{T}\right)$	Aboudheir, 2006
[OH ⁻]	$2,53 \times 10^{11} \exp\left(\frac{-4311}{T}\right)$	Thee, 2012

Pada suhu 303,15 K didapat masing-masing k_{app} dari berbagai pelarut yaitu 8.829×10^6 L/mol.s untuk glycine, 2.612×10^3 L/mol.s untuk MEA, 1.145×10^3 L/mol.s untuk MDEA, dan 1.687×10^5 L/mol.s untuk K₂CO₃. Berdasarkan data tersebut dapat dilihat bahwa nilai k_{app} glycine lebih besar dibandingkan pelarut lainnya dan hal ini menunjukkan glycine lebih baik dalam proses absorpsi karbon dioksida.



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadi. M, Gomes. V.G, Advanced Modelling in Performance Optimization for Reactive Separation in Industrial CO₂ Removal, *Separation and Purification Technology* 63 (2008) 107-115.
- Altway. A, Perpindahan Massa disertai reaksi kimia, Bee Marketer Institute, Jakarta, 2008.
- Aronu. E.U, Svenden. F.S, Investigation of Amine Amino Acid Salt for Carbon Dioxide Absorbtion, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4 (2010) 771-775.
- Astarita. G, Carbon Dioxide Absorption in Aqueous Monothanolamine Solutions, *Chemical Engineering Science* 16 (1960) 202-207.
- Astarita. G, Savage. D.W, Promotion of CO₂ Mass Transfer in Carbonate Solutions, *Chemical Engineering Science* 36 (1980) 581-588.
- Augugliaro. V, dan Rizzuti. L, Kinetics of carbon dioxide absorption into catalysed potassium carbonate solutions, *Chem.Eng. Sci.* 42 (1987) 2339-2343.
- Bosch. H, Versteeg. G.F, Gas-Liquid Mass Transfer with Parallel Reversible Reactions I. Absorption of CO₂ into Solution of Sterically Hindered Amines, *Chemical Engineering Science* 44 (11) (1989) 2723-2734.
- Bishnoi. P.S, dan Rochelle. G.T, "Absorption of carbon dioxide into aqueous piperazine: Reaction kinetics, mass transfer and solubility", *Chem. Eng. Sci.* 55 (22) (2000) 5531-5543.
- Bishnoi. P.S, Carbon dioxide absorption and solution equilibrium in piperazine activated methyldiethanolamine, Ph.D Dissertation, The University of Texas at Austin (2000).
- Blauwhoff. P.M.M, Versteeg. G.F, A Study on The Reaction between CO₂ And Alkanolamines in Aqueous Solutions, *Chemical Engineering Science* 38 (9) (1983) 1411-1429.

- Brouwer. J.P, Feron. P.H.M, Asbroek ten, N.A.M, "Amino-acid salt for CO₂ Capture from Flue Gas", TNO Science & Industry, Department of Separation Technology (2005).
- Cullinane. J.T, dan Rochelle. G.T, Carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by piperazine, Chem.Eng. Sci. 59 (2004) 3619-3630.
- Cullinane. J.T, Thermodynamics and kinetics of aqueous piperazine with potassium carbonate for carbon dioxide absorption, Dissertation, University of Texas, Austin (2005).
- Dang. Hongyi, Rochelle. G.T, CO₂ Absorption Rate and Solubility in Monoethanolamine/Piperazine/Water, The University of Texas at Austin (2001).
- Danckwerts. P.V, Gas-Liquid Reactions, McGraw-Hill, New York, 1970.
- Gorak, Andrzej, European Roadmap of Process Intensification: Reactive Absorption, Creative Energie (2005).
- Gosh. U.K, Kentish. S.E, Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Potassium Carbonate Promoted by Boric Acid, Energy Procedia 1 (2009) 1075-1081
- Herzog, Howard., Golomb, Dan, Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel Use, Massachusetts Institute of Technologi, Laboratory for Energy and the Environment (2004).
- Khodayari, Arezoo, Experimental and Theoretical Study of Carbon Dioxide Absorption into Potassium Carbonate Solution Promoted with Enzyme, University of Illinois (2010).
- Knuutila, Hanna, Juliussen, Olav, Density and N₂O Solubility of Sodium and Potassium Carbonate Solutions in The Temperature Range 25 to 80°C, Chemical Engineering Science (2010) 2177-2182
- Kumar. S.Dash, Samanta. A, Absorption of Cabon Dioxide in Piperazine Activated Concentrated Aqueous 2-amino-2-

- methyl-1-propanol Solvent, Chemical Engineering Science 66 (2011) 3223-3233
- Lin. S.H, dan Shyu. C.T, Performance characteristics and modeling of carbon dioxide absorption by amines in a packed column, Waste Management 19 (1999) 255-262.
- Pacheco. M.A, Kaganoi. S, Rochelle. G.T, CO₂ Absorption into Aqueous Mixtures of Diglycolamine and Methyldiethanolamine, Chemical Engineering Science 55 (2000) 5125-5140
- Polasek. J, dan Bullin. J.A, Selecting amines for sweetening units, Tulsa, OK: Gas Processors Association (1994).
- Rahimpour. M.R, Kashkooli. A.Z, Enhanced Carbon Dioxide Removal by Promoted Hot Potassium Carbonate in a Split-Flow Absorber, Chemical Engineering and Processing 43 (2004) 857-865.
- Rao. A.B, Rubin. E.S, A Technical, Economic and Environmental Assessment of Amine-based CO₂ Capture Technology for Power Plant Greenhouse Gas Control, National Energy Technology Laboratory, West Virginia, (2002).
- Rochelle. G.T, Dugas. R.E, Carbon Dioxide Absorption, Desorption, and Diffusion in Aqueous Piperazine and Monoethanolamine, The University of Texas at Austin, (2009).
- Seo. J.B, Jeon. S.B, Kim. J.Y, Vaporization Reduction Characteristic of Aqueous Ammonia Solution by The Addition of Ethylene Glycol, Glycerol and Glycine to The CO₂ Absorption Process, Journal of Environmental Sciences 24(3) (2012) 494-498
- Shakashiri, Carbon Dioxide,CO₂ , *Chemical of the Week* (2008).
- Shen. S. Feng. X, Zhao. R, Kinetic Study of Carbon Dioxide Absorption with Aqueous Potassium Carbonate Promoted by Arginine, Chemical Engineering Journal 222 (2013) 478-487
- Thee. H, Smith. K.H, Silva. da Gabriel, Kentish, S.E, Carbon Dioxide Absorption into Unpromoted and Borate-

- Catalyzed Potassium Carbonate Solutions ,Chemical Engineering Journal 181-182 (2012) 604-701
- Wibawa. Gede, Gunawan. Setiyo, Cryogenic Freeze-Out Area Heat Exchanger Sebagai Salah Satu Alternatif Pencairan dan Penghilangan CO₂ pada Liquified Natural Gas Skala Kecil dan Sedang, Pusat Studi Energi dan Rekayasa Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (2011).
- Wang. M, Lawal. A, Stephenson. P, Post-combustion CO₂ Capture with Chemical Absorpstion: A State-of-the-Art Review, Chemical Engineering Research and Design 89, (2011) 1609-1624.
- Yi. Fei, Zou. Hai-Kui, Chu. Guang-Wen, Shao. Lei, Modeling and Experimental Studies on Absorption of CO₂ by Benfield Solution in Rotating Packed Bed, Chemical Engineering Journal 145 (2009) 377-384
- Yih. S.M, Sun. C.C, Simultaneous Absorption of Hydrogen Sulphide and Carbon Dioxide into Potassium Carbonate Solution with or without Amine Promoters, The Chemical Engineering Journal 34 (1987) 65-72

BAB V

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian data kinetika reaksi absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine* berpromotor *glycine* menggunakan peralatan *wetted wall column* pada temperatur 303,15 K – 328,15 K dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Kenaikan temperatur dari 303,15 K hingga 328,15 K akan meningkatkan laju absorpsi gas karbon dioksida berpromotor *glycine* sebesar 24,2%.
2. Kenaikan konsentrasi promotor *glycine* dari 1% berat sampai 3% berat dalam larutan *diethanolamine* menghasilkan kenaikan laju absorpsi gas karbon dioksida sebesar 59,764%. Sehingga penambahan *glycine* sebagai promotor dapat menambah laju absorpsi karbon dioksida pada larutan *diethanolamine* dan mampu menutupi kelemahan larutan *diethanolamine*.
3. Dari penelitian ini didapatkan persamaan konstanta kinetika reaksi untuk *glycine* yaitu $k_{glycine} = 1.419 \times 10^{12} \exp(-3634/T) (\text{m}^3/\text{kmol.s})$.



Halaman ini sengaja dikosongkan

APPENDIKS A

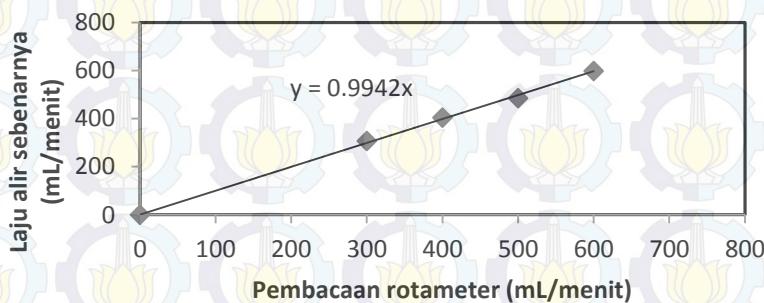
A.1 Kalibrasi Rotameter Liquid

Sebelum dilakukan penelitian, terlebih dahulu dilakukan kalibrasi peralatan rotameter liquid. Dari hasil kalibrasi peralatan, diperoleh data laju alir sebagai berikut :

Tabel A.1 Data kalibrasi rotameter liquid

Pembacaan rotameter (ml/menit)	Laju alir sebenarnya (ml/menit)
0	0
300	307
400	404
500	485
600	598

Berdasarkan hasil pengukuran di atas, diperoleh grafik kalibrasi rotameter liquid yang ditunjukkan pada gambar A.1



Gambar A.1 Kalibrasi Rotameter liquid

Sehingga didapatkan persamaan kalibrasi rotameter berdasarkan **Gambar A.1** adalah $y = 0.9942x$

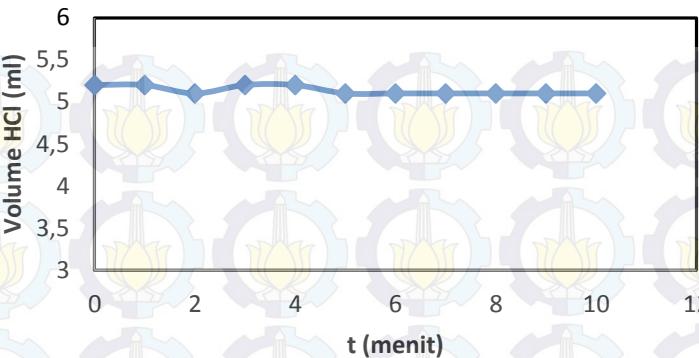
A.2 Menentukan Keadaan Steady State

Keadaan steady state merupakan kondisi dimana tidak ada perubahan konsentrasi dan tidak dipengaruhi oleh waktu. Berdasarkan penelitian didapatkan hubungan konsentrasi tiap waktunya seperti yang didapatkan sebagai berikut :

Tabel A.2 Data volume HCl sebagai penitran dalam titrasi

Waktu (menit)	Volume penitranHCl (mL)
Awal	4,9
0	5,2
1	5,2
2	5,1
3	5,2
4	5,2
5	5,1
6	5,1
7	5,1
8	5,1
9	5,1
10	5,1

Sehingga dapat dibuat grafik hubungan volume HCl dengan waktu sebagai berikut :



Gambar A.2 Pembacaan Keadaan Steady State

Berdasarkan **Gambar A.2** dapat diketahui bahwa kondisi steady state dicapai pada waktu $t = 5$ menit. Sehingga pengambilan sampel pada penelitian ini dilakukan pada saat $t = 5$ menit.

A.3 Analisa Data

Berikut adalah contoh perhitungan hasil eksperimen pada variable konsentrasi promoter *glycine* (1% w/w). Laju alir pelarut 200 ml/menit dan suhu 30°C (303.15 K)

Analisa Awal Larutan :

Untuk pembuatan pelarut, campuran DEA, glycine dan aquadest dapat dibuat dengan perhitungan, contoh:

Basis : 2000g

DEA(30%)	:	600	g
Glycine(1%)	:	20	g
Aquadest	:	1380	g
Total	:	2000	g

Untuk menganalisa adanya kandungan karbonat dan bikarbonat mula-mula dalam larutan, dilakukan titrasi menggunakan asam klorida (HCl) dengan indicator PP dan MO. Titrasi pertama bertujuan untuk mengetahui kandungan karbonat mula – mula sebagai berikut :

Volume sampel larutan : 10 mL

Molaritas HCl : 2 M

Volume HCl (V_{HCl})_{PP} : 5 mL

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol karbonat mula – mula dalam 10 mL sampel larutan yaitu :

$$[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{mula-mula}} = \frac{M_{HCl} \times V_{HCl} (\text{PP}) \times \text{faktor pengenceran}}{V_{\text{sampel}}} \\ = \frac{2 \text{ M} \times 5 \text{ mL} \times 2}{10 \text{ mL}} \\ = 2 \text{ mmol/mL} \approx 2 \text{ kmol/m}^3$$

Titrasi kedua bertujuan untuk mengetahui kandungan bikarbonat mula-mula sebagai berikut :

Volume sampel larutan : 10 mL

Molaritas HCl : 2 M

Volume HCl (V_{HCl})_{MO} : 5 mL

Volume HCl (V_{HCl})_{MO-PP}: 0 mL

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol bikarbonat mula – mula dalam 10 mL sampel larutan yaitu :

$$[\text{HCO}_3^-]_{\text{mula-mula}} = \frac{M_{HCl} \times V_{HCl} (\text{PP}) \times \text{faktor pengenceran}}{V_{\text{sampel}}} \\ = \frac{2 \text{ M} \times 0 \text{ mL} \times 2}{10 \text{ mL}} \\ = 0 \text{ mmol/mL} \approx 0 \text{ kmol/m}^3$$

Analisa Akhir Larutan :

Untuk menganalisa adanya kandungan karbonat dan bikarbonat akhir dalam larutan, dilakukan titrasi menggunakan asam klorida (HCl) dengan indicator PP dan MO. Titrasi

pertama bertujuan untuk mengetahui kandungan karbonat akhir sebagai berikut :

Volume sampel larutan : 10 mL

Molaritas HCl : 2 M

Volume HCl (V_{HCl})_{PP} : 5.15 mL

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol karbonat akhir dalam 10 mL sampel larutan yaitu:

$$\text{Mol CO}_3^{2-} \text{ akhir} = \frac{M_{HCl} \times V_{HCl} (\text{PP}) \times \text{faktor pengenceran}}{V_{\text{sampel}}} =$$

$$\frac{2 \text{ M} \times 5.15 \text{ mL} \times 2}{10 \text{ mL}}$$

$$= 2.06 \text{ mmol/mL} \approx 2.06 \text{ kmol/m}^3$$

Titrasi kedua bertujuan untuk mengetahui kandungan bikarbonat akhir sebagai berikut:

Volume sampel larutan : 10 mL

Molaritas HCl : 2 M

Volume HCl (V_{HCl})_{MO} : 5.35 mL

Volume HCl (V_{HCl})_{MO-PP} : 0.2 mL

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol bikarbonat mula-mula dalam 10 mL sampel larutan yaitu :

$$\text{Mol HCO}_3^- \text{ akhir} = \frac{M_{HCl} \times V_{HCl} (\text{PP}) \times \text{faktor pengenceran}}{V_{\text{sampel}}} =$$

$$\frac{2 \text{ M} \times 0.2 \text{ mL} \times 2}{10 \text{ mL}} = 0.08 \text{ mmol/mL} \approx 0.08 \text{ kmol/m}^3$$

Menentukan Konsentrasi Gas Karbondioksida Terlarut [CO_2]_e dan Konsentrasi [OH]

$$\log K_1 = \left(-\frac{3404,7}{T} + 14,843 - 0,03279T \right)$$

$$K_2 = \exp \left(-294,74 + \frac{3,6439 \times 10^5}{T} - \frac{1,8416 \times 10^8}{T^2} \right)$$

$$+ \frac{4,1579 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{3,5429 \times 10^{12}}{T^4} \right)$$

$$K_w = \exp \left(39,555 - \frac{9,879 \times 10^4}{T} + \frac{5,6883 \times 10^7}{T^2} \right)$$

$$- \frac{1,465 \times 10^{10}}{T^3} + \frac{1,3615 \times 10^{12}}{T^4} \right)$$

$$K_b = \exp(-3071.15/T + 6.77 \ln T + (-48.76))$$

$$K_{eq} = \exp \left(-\frac{17067.2}{T} + (-66.8 \ln T) + 439.71 \right)$$

Dimana :

$$T = 30^\circ\text{C} = 303.15 \text{ K}$$

$$[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{rata-rata}} = \frac{(2-2.06)}{2} = 2.03 \text{ kmol/m}^3$$

$$[\text{HCO}_3^-] = 0.08 \text{ kmol/m}^3$$

Didapatkan nilai $K_1 = 4.6950 \times 10^{-7} \text{ kmol/m}^3$, $K_w = 1.4907 \times 10^{-14} \text{ kmol}^2/\text{m}^6$, $K_b = 1.75 \times 10^{-9} \text{ kmol/m}^3$, $K_c = 2.3 \times 10^{-4} \text{ kmol/m}^3$, $K_{eq} = 5.47 \text{ kmol/m}^3$ dan

$k_2 = 5.156 \times 10^{-11} \text{ kmol/m}^3$. Sehingga konsentrasi CO_2 terlarut pada suhu 303.15 K adalah :

$$\begin{aligned} [\text{CO}_2]_e &= \frac{K_c K_2}{K_{eq} K_1} \frac{[\text{HCO}_3^-]^2}{[\text{CO}_3^{2-}]} \\ &= \frac{0.00023 \text{ kmol/m}^3 \times 5.156 \times 10^{-11} \text{ kmol/m}^3}{5.47 \text{ kmol/m}^3 \times 4.6950 \times 10^{-7} \text{ kmol/m}^3} \frac{(0.08 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3})^2}{(2.03 \text{ kmol/m}^3)} \\ &= 3.46226 \times 10^{-9} \text{ kmol/m}^3 \end{aligned}$$

Menentukan Laju Absorpsi Gas Karbondioksida

$$\begin{aligned} \text{Laju alir pelarut (v)} &= 200 \text{ ml/menit} \\ &= 3.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{mula-mula}} &= 2 \text{ kmol/m}^3 \\
 [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{akhir}} &= 2.06 \text{ kmol/m}^3 \\
 [\text{HCO}_3^{2-}]_{\text{awal}} &= 0 \text{ kmol/m}^3 \\
 [\text{HCO}_3^{2-}]_{\text{akhir}} &= 0.08 \text{ kmol/m}^3
 \end{aligned}$$

Sehingga laju absorpsi gas karbondioksida adalah :

$$\begin{aligned}
 q &= v \times [([\text{CO}_3^{2-}]_{\text{mula-mula}} - [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{akhir}}) + ([\text{HCO}_3^{2-}]_{\text{akhir}} - [\text{HCO}_3^{2-}]_{\text{awal}})] \\
 &= (3.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{menit}) \times [(2.06 \text{ kmol/m}^3) - (2 \text{ kmol/m}^3) + \{(0.08 \text{ kmol/m}^3) - (0 \text{ kmol/m}^3)\}] \\
 &= 4.66667 \times 10^{-7} \text{ kmol/det}
 \end{aligned}$$

Menentukan Waktu Kontak

$$t_c = \frac{h}{U_s} = \frac{2h}{3} \left[\frac{3\mu}{g\rho} \right]^{1/3} \left[\frac{\pi d}{v} \right]^{2/3}$$

Dimana,

$$h = 0.093 \text{ m}$$

$$\mu_{\text{larutan}} = 0.002411 \text{ kg/m.s}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$\rho_{\text{larutan}} = 1036 \text{ kg/m}^3$$

$$d = 0.013 \text{ m}$$

$$v = 200 \text{ ml/menit} \approx 3.333 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det}$$

$$\pi = 3.14$$

Sehingga waktu kontak antara gas dengan larutan adalah :

$$\begin{aligned}
 t_c &= \frac{2(0.093 \text{ m})}{3} \left[\frac{3(0.002411 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}})}{(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(1036 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})} \right]^{1/3} \left[\frac{(3.14)(0.013 \text{ m})}{(3.333 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det})} \right]^{2/3} \\
 &= 0.294115772 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

Menentukan Laju Rata-Rata Absorpsi Selama } t \text{ Waktu}

$$\frac{Q(t)}{t} = \frac{q}{\pi dh}$$

dimana,

$$q = 4.66667 \text{E-}07 \text{ kmol/detik}$$

$$h = 0.013 \text{ m}$$

$$d = 0.093 \text{ m}$$

Maka, laju rata-rata absorpsi yang didapat selama t waktu ($Q(t)/t$) adalah :

$$\begin{aligned}\frac{Q(t)}{t} &= \frac{4.66667 \text{E-}07 \text{ kmol/det}}{(3.14)(0.093 \text{ m})(0.013 \text{ m})} \\ &= 0.000122928 \text{ kmol/m}^2\end{aligned}$$

Menentukan Konstanta Henry

Harga konstanta Henry didapat dari persamaan berikut :

$$\log\left(\frac{He}{He^0}\right) = h_1 I_1 + h_2 I_2$$

dimana, He^0 adalah konstanta henry untuk sistem gas-cair dan I adalah kekuatan ionic dari larutan yang diperoleh dari :

$$H_e^0 = H_{e298} \exp\left[\frac{-d \ln k_H}{d\left(\frac{1}{T}\right)} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right]$$

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2$$

C_i adalah konsentrasi ion – ion yang valensinya Z_i .

$$h = h_+ + h_- + h_G$$

$$h_G = h_{G,o} + h_T(T-298.15)$$

Namun pada pelarut DEA ini tidak terionisasi sehingga $I=0$

$$\begin{aligned}\log\left(\frac{He}{He^0}\right) &= 0 \\ He &= He^0\end{aligned}$$

Sehingga, konstanta Henry dapat dihitung sebagai berikut :

$$H_e^0 = 3.6 * (10^5) \exp(2200 * (1/303.15 - 1/298))$$

$$= 3.17566 \text{E-}05 \text{ mol/cm}^3 \cdot \text{atm}$$

$$= 3.17566 \text{E-}07 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{Pa}$$

$$= 3148947.125 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa/kmol}$$

Menentukan Diffusivitas CO_2 dan CO_3^{2-}

- Diffusivitas CO_2 dan CO_3^{2-} dalam air dapat dihitung menggunakan persamaan Wilke Chang (Wilke dan Chang, 1955) sebagai berikut :

$$D_{AL(\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O})} = 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_B)} \frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}}$$

dimana, φ = association parameter dari pelarut (water = 2.6)

M_B = Berat molekul pelarut (kg/kmol)

T = Suhu operasi (K)

μ_B = viskositas pelarut (kg/m.s)

V_A = Solute molar volume (m^3/kmol)

$$D_{AL(\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O})} = 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_B)} \frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}} = \\ 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(2.6)(18 \text{ kg/kmol})} \frac{303.15 \text{ K}}{\left(0.8007 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}\right) (34 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kmol})^{0.6}} \\ = 2.31058 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{det}$$

*Dengan cara yang sama, didapatkan $D_{BL(\text{CO}_3^{2-}-\text{H}_2\text{O})}$ sebesar $1.04496 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{det}$

- Diffusivitas CO_2 dalam gas N_2 didapat dari tabel 6.2-1 (Geankoplis,1993) pada suhu

298 K sebesar $0.167 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{det}$, sehingga perlu dilakukan koreksi suhu sebagai berikut:

$$\left(\frac{D_{AG,T}}{D_{AG,T_o}} \right) = \left(\frac{T}{T_o} \right)^{1,75}$$

Sehingga, diffusivitas CO_2 dalam gas $\text{N}_2(D_{AG})$ pada suhu 303.15 K adalah:

$$\left(\frac{D_{AG, 303.15 \text{ K}}}{0.167 \times 10^{-4}} \right) = \left(\frac{303.15 \text{ K}}{298.15 \text{ K}} \right)^{1,75}$$

$$(D_{AG, \ 303.15\ K}) = \left(\frac{303.15\ K}{298.15\ K} \right)^{1.75} \times 0.167 \times 10^{-4}$$

$$(D_{AG, \ 303.15\ K}) = 1.71932 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{det}$$

Menentukan Koefisien Perpindahan Massa sisi Gas (k_g)

$$k_g = \frac{Sh D_{AG}}{R T d}$$

dimana,

$$\begin{aligned} Sc &= \text{Schmidt number} = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{AG}} \\ &= \frac{1.73772 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}}{1.25774 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.71932 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{det}} = 0.804 \end{aligned}$$

$$v = \frac{4 Q_G}{\pi x d^2} = \frac{4 \times (0.0001 \frac{\text{m}^3}{\text{s}})}{\pi x (0.013 \text{ m})^2} = 0.753778 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

dimana Q_G (laju alir gas) = 6 L/min = 0.0001 m^3/s

Re = Reynold number

$$\begin{aligned} &= \frac{\rho_g v d}{\mu_g} \\ &= \frac{1.25774 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.753778 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.013 \text{ m}}{1.73772 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}} \\ &= 709.2467 \end{aligned}$$

Sh = Sherwood number

$$\begin{aligned} &= 1.075 (Re Sc \frac{d}{h})^{0.85} \\ &= 1.075 (709.2467 \times 0.804 \times \frac{0.013 \text{ m}}{0.093 \text{ m}})^{0.85} \\ &= 44.41 \end{aligned}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} k_g &= \frac{44.41 \times 1.71932 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{det}}{8314 \frac{\text{m}^3 \text{Pa}}{\text{kg mol.K}} \times 303.15 \text{ K} \times 0.013 \text{ m}} \\ &= 2.33051 \times 10^{-8} \text{ kmol/s.m}^2.\text{Pa} \end{aligned}$$

Menentukan Koefisien Perpindahan Massa Sisi Cairan (k_L)

$$k_L = 0.422 \sqrt{\frac{D_{AL} x \Gamma}{\rho (B_F)^2}}$$

dimana,

Γ = liquid-flow rate, (kg/m.s) based on wetted perimeter

ρ = liquid density, (kg/m³)

h = panjang area kontak, (m)

μ = viskositas liquid, (kg/m.s)

g = gravity acceleration, (9.80665 m/s²)

k_L = koefisien perpindahan massa sisi cairan, (kmol/s.m²)

$$\Gamma = \frac{Q_G x \rho_L}{h} = \frac{3.333 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} \times 1036 \text{ kg/m}^3}{0.093 \text{ m}} = 0.042939 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$$

$$B_F = \left\{ \frac{3 \mu_L \Gamma}{\rho^2 g} \right\}^{1/3}$$

$$B_F = \left\{ \frac{3 \times \left(0.002411 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \right) \times (0.042939 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}})}{(1036 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})^2 \times (9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})} \right\}^{1/3} = 0.000309002 \text{ m}$$

Sehingga,

$$k_L = 0.422 \sqrt{\frac{2.31058 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times 0.042939 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}}{1036 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (0.000309002 \text{ m})^2}} = 0.000422628 \text{ kmol/s.m}^2$$

Menentukan Konsentrasi CO₂ dalam Interface (C_{Ai}) dan Konstanta Kecepatan Reaksi Overall Pseudo First Order (k_{ov})

$$C_{Ai} = \frac{k_g P_A + C_{Ae} \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \quad \dots \dots \dots \text{(a)}$$

$$\frac{Q}{t} = \bar{R} = (C_{Ai} - C_{Ae}) \sqrt{D_{AL} x k_{ov}} \quad \dots \dots \dots \text{(b)}$$

dimana,

k_g	= Koefisien perpindahan massa sisi gas, (kmol/s.m ² .Pa)
P_A	= Tekanan parsial gas CO ₂ , (Pa)
C_{Ae}	= Konsentrasi gas CO ₂ berkesetimbangan dalam cairan,(kmol/m ³)
D_{AL}	= Koefisien difusi gas CO ₂ , (m ² /det)
He	= Konstanta Henry , (Pa.m ³ /kmol)

$$\text{Misal : } \varphi = \sqrt{D_{AL} x k_{ov}}$$

Substitusikan pers (a) → (b)

$$\begin{aligned} \frac{Q}{t} &= \left(\frac{k_g P_A + C_{Ae} \varphi}{k_g H_e + \varphi} - C_{Ae} \right) \varphi \\ &= \left(\frac{k_g P_A + C_{Ae} \varphi - C_{Ae} k_g H_e - C_{Ae} \varphi}{k_g H_e + \varphi} \right) \varphi \\ &= \left(\frac{k_g P_A - C_{Ae} k_g H_e}{k_g H_e + \varphi} \right) \varphi \\ \frac{Q}{t} k_g H_e + \frac{Q}{t} \varphi &= k_g P_A \varphi - C_{Ae} k_g H_e \varphi \\ \varphi &= \frac{\frac{Q}{t} k_g H_e}{k_g P_A - C_{Ae} k_g H_e - \frac{Q}{t}} = 6.99 \times 10^{-3} \text{ m/det} \end{aligned}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} \varphi &= \sqrt{D_{AL} x k_{ov}} \\ \varphi^2 &= D_{AL} x k_{ov} \\ k_{ov} &= \varphi^2 / D_{AL} \\ &= (0.025824868 \text{ m/det})^2 / 2.31058 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{det} \\ &= 288638.908 \text{ det}^{-1} \end{aligned}$$

$$C_{Ai} =$$

$$\frac{k_g P_A + C_{Ae} \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \frac{\left(2.33051 \times 10^{-8} \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}\right) (0.2 \times 101325 \text{ Pa}) + (3.46 \times 10^{-9}) \sqrt{\left(2.31058 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{det}}\right) (288638.908/\text{det})}}{\left(2.33051 \times 10^{-8} \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}\right) \left(3148947.125 \text{ m}^3 \frac{\text{Pa}}{\text{kmol}}\right) + \sqrt{\left(2.31058 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{det}}\right) (288638.908/\text{det})}}$$

$$= 0.00476041 \text{ kmol/m}^3$$

Menentukan apparent reaction rate constant (k_{app})

$$\begin{aligned} \log_{10} k_{OH^-} &= 13,635 - \frac{2895}{T} \\ &= 13,635 - \frac{2895}{303.15 K} \\ k_{OH^-} &= 12169.4834 \text{ m}^3/\text{kmol.det} \\ [\text{OH}^-] &= \frac{K_w [CO_3^{2-}]}{K_2 [HCO_3^-]} \\ &= \frac{1.4907 \times 10^{-14} \text{ kmol}^2/\text{m}^6}{5.156 \times 10^{-11} \text{ kmol}/\text{m}^3} \frac{(2.03 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3})}{(0.08 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3})} \\ &= 0.00733647 \text{ kmol}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

Konsentrasi 1% glycine dalam 1000 gr larutan DEA dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{BM glycine} = 75.07 \text{ g/mol}$$

$$\rho_{\text{airt.}} = 1036 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{1 \text{ kg}}{v} = 1036 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 965 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$= 0.965 \text{ L}$$

$$\text{Mol glycine} = 10/75.05 = 0.133 \text{ mol}$$

$$\text{Molaritas glycine} = 0.133 \text{ mol}/0.965 \text{ L} = 0.138 \text{ mol/liter}$$

$$\begin{aligned} k_{app} &= k_{ov} - k_{OH^-} [\text{OH}^-] - k_{DEA} [\text{DEA}] \\ &= (288638.908) - \{(12169.4834) \times \\ &\quad (0.00733647)\} - (2611.987) \\ &= 288549.6276 \text{ det}^{-1} \end{aligned}$$

Pembuktian Regim Reaksi Cepat Pseudo First Order

Kondisi reaksi pada absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine* berpromotor umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai yaitu $3 < \frac{H_a}{E_i} < \frac{1}{2}$ Ei (Danckwerts, 1970; Lin dkk, 2009) :

$$H_a = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L}$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{C_{B0}}{z C_{Ai}} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad \text{dimana,}$$

k_{ov} = Konstanta kecepatan reaksi overall pseudo first order, (det^{-1})

D_{AL} = Diffusivitas CO_2 dalam H_2O , (m^2/det)

D_{BL} = Diffusivitas CO_3^{2-} dalam H_2O , (m^2/det)

k_L = Koefisien perpindahan massa sisi cairan, ($\text{kmol}/\text{s.m}^2$)

C_{B0} = Konsentrasi awal reaktan, (kmol/m^3)

Z = Koefisien mol reaktan yang bereaksi dengan 1 mol gas terlarut

C_{Ai} = Konsentrasi gas CO_2 dalam *interface*, (kmol/m^3)

$$\begin{aligned} H_a &= \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L} \\ &= \frac{\sqrt{(288638.9087 \text{ det}^{-1})(2.31058 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{det}})}}{(0.0004226 \frac{\text{kmol}}{\text{s.m}^2})} \\ &= 61.1 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2} E_i = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{C_{B0}}{z C_{Ai}} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 &= \\
 \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{(2.31058 x \frac{10^{-9} m^2}{\text{det}})}{(1.04496 \times 10^{-9} \frac{m^2}{\text{det}})}} + \right. \\
 &\quad \left. \frac{\frac{(2.03 \frac{\text{kmol}}{m^3})}{(1)(0.0047 \frac{\text{kmol}}{m^3})} \sqrt{\frac{(1.04496 \times 10^{-9} \frac{m^2}{\text{det}})}{(2.31058 x \frac{10^{-9} m^2}{\text{det}})}}}{\right\} \\
 &= 142.01
 \end{aligned}$$

Karena hasil yang didapat sudah memenuhi ketentuan yang ada $3 < Ha < \frac{1}{2} E_i$, maka TERBUKTI bahwa reaksi ini berada pada regim cepat *pseudo first order*.

Menentukan Persamaan Konstanta Kecepatan Reaksi untuk Glycine

Dari data yang didapat dari perhitungan untuk masing-masing suhu dan konsentrasi glycine, maka diperoleh :

Tabel A.3 Data Perhitungan Konsentrasi Glycine dan Konstanta Kecepatan Reaksi Apparent

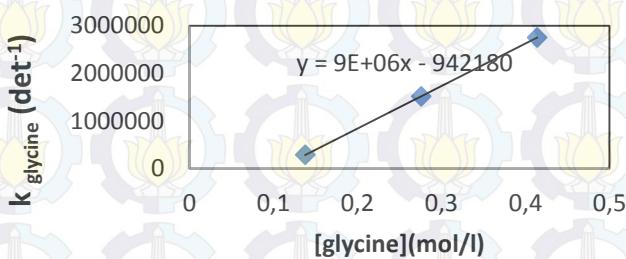
T (Kelvin)	[Glycine] (mol/L)	k _{Glycine} [Glycine], k _{app} (det ⁻¹)
303.15	1%	288549.6276
	2%	1513199.904
	3%	2748305
308.15	1%	670598.4735
	2%	2346651.049
	3%	3171857
313.15	1%	761580.9358
	2%	2693474.909

	3%	0.414	4973644
318.15	1%	0.138	1204315.331
	2%	0.275	3089710.864

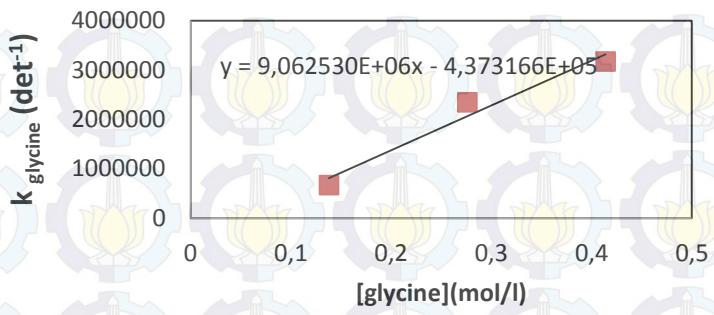
Lanjutan Tabel A.3 Data Perhitungan Konsentrasi Glycine dan Konstanta Kecepatan reaksi Apparent

T (Kelvin)	[Glycine] (mol/L)	$k_{\text{glycine}} [Glycine],$ k_{app} (det ⁻¹)
318.15	3%	0.414
	1%	0.138
	2%	0.275
323.15	3%	0.414
	1%	0.138
	2%	0.275
328.15	3%	0.414
	1%	0.138
	2%	0.275
	3%	0.414
		7667924

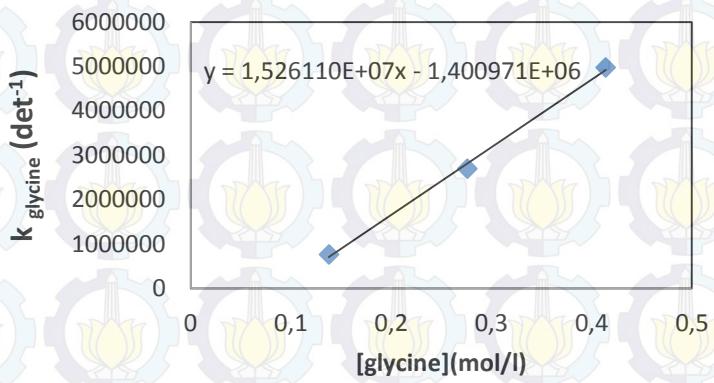
Dari data yang didapatkan pada Tabel A.3, maka dapat dibuat grafik hubungan antara k_{glycine} dengan konsentrasi glycine dalam larutan sebagai berikut :



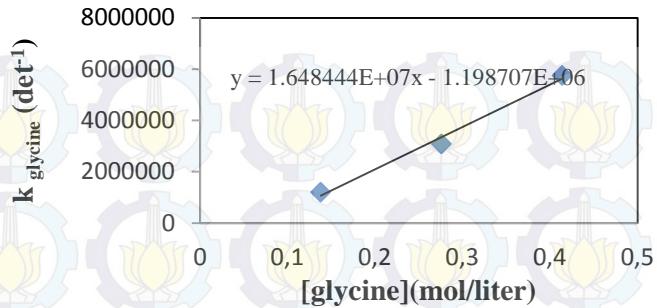
Gambar A.3 Hubungan k_{app} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 303.15 K



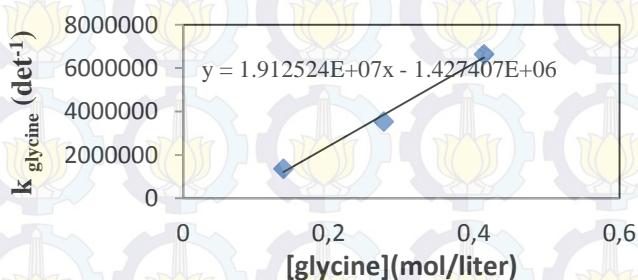
Gambar A.4 Hubungan k_{glycine} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 308.15 K



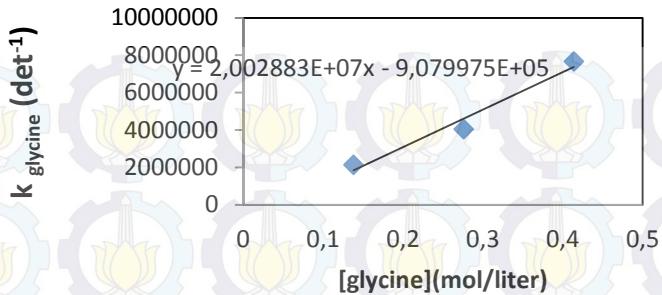
Gambar A.5 Hubungan k_{glycine} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 313.15 K



Gambar A.6 Hubungan k_{glycine} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 318.15 K



Gambar A.7 Hubungan k_{glycine} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 323.15 K



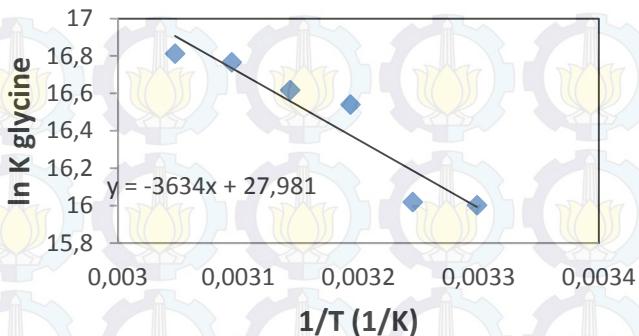
Gambar A.8 Hubungan k_{glycine} dengan $[\text{glycine}]$ dalam larutan DEA pada suhu 328.15 K

Dari Gambar A.3 sampai A.8 didapat slope untuk masing-masing grafik, dimana slope tersebut merupakan konstanta kecepatan reaksi *glycine* untuk masing-masing suhu operasi yaitu 303.15 K – 328.15 K. Setelah itu, barulah persamaan konstanta kecepatan reaksi *glycine* pada fungsi suhu dapat ditentukan dari persamaan *Arhenius* sebagai berikut :

- $k_{\text{glycine}} = A_{\text{glycine}} e^{-\frac{E}{RT}}$
- $\ln k_{\text{glycine}} = \ln A - \frac{E}{RT}$

Tabel A.4 Data konstanta kecepatan reaksi *glycine* pada suhu 303.15 K-328.15 K

T (K)	Slope = k_{glycine}	1/T	$\ln k_{\text{glycine}}$
303.15	8.91E+06	0.0033	16.002927
308.15	9.06E+06	0.00325	16.019659
313.15	1.53E+07	0.00319	16.540818
318.15	1.65E+07	0.00314	16.617927
323.15	1.91E+07	0.00309	16.766519
328.15	2.00E+07	0.00305	16.812683



Gambar A.9 Hubungan $\ln k_{\text{glycine}}$ dengan $1/T$ pada persamaan Arhenius

Dari **Gambar A.9** didapatkan persamaan garis : $y = -3634x + 27.98$, maka :

$$\begin{aligned}
 \text{Slope} &= -\frac{E}{R} = -3634 \\
 \text{Intercept} &= \ln A \\
 \ln A &= 27.98 \\
 A &= 1.419 \times 10^{12}
 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan persamaan k_{glycine} sebagai berikut :

$$k_{\text{glycine}} \text{ (m}^3/\text{kmol.s)} = 1.419 \times 10^{12} e^{-\frac{-3634}{T}}$$

APPENDIKS B

B.1 Hasil Analisa Menggunakan Metode Titrasi

Tabel B.1 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan promotor *glycine* pada konsentrasi 1% berat

T (K)	Molaritas HCl (M)	Vol HCl (pp)	Vol HCl (mo)	$[CO_3^{2-}]$ awal (mmol/mL)	$[HCO_3^-]$ (mmol/mL)	$[CO_3^{2-}]$ akhir (mmol/mL)	$[CO_3^{2-}]$ rata-rata (mmol/mL)
303.15	2	5.15	5.35	2	0.08	2.06	2.03
308.15	2	5.25	5.35	2	0.04	2.1	2.05
313.15	2	5.25	5.4	2	0.06	2.1	2.05
318.15	2	5.3	5.4	2	0.04	2.12	2.06
323.15	2	5.3	5.4	2	0.04	2.12	2.06
328.15	2	5.35	5.4	2	0.02	2.14	2.07

Tabel B.2 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan promotor *glycine* pada konsentrasi 2% berat

T (K)	Molaritas HCl (M)	Vol HCl (pp)	Vol HCl (mo)	$[CO_3^{2-}]$ awal (mmol/mL)	$[HCO_3^-]$ (mmol/mL)	$[CO_3^{2-}]$ akhir (mmol/mL)	$[CO_3^{2-}]$ rata-rata (mmol/mL)
303.15	2	5.45	5.6	2	0.06	2.18	2.09
308.15	2	5.5	5.65	2	0.06	2.22	2.11
313.15	2	5.55	5.65	2	0.04	2.22	2.11
318.15	2	5.55	5.65	2	0.04	2.22	2.11
323.15	2	5.6	5.65	2	0.04	2.24	2.12
328.15	2	5.6	5.65	2	0.02	2.24	2.12

Tabel B.3 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan promotor *glycine* pada konsentrasi 3% berat

T (K)	Molaritas HCl (M)	Vol HCl (pp)	Vol HCl (mo)	$[CO_3^{2-}]$ awal (mmol/mL)	$[HCO_3^-]$ (mmol/mL)	$[CO_3^{2-}]$ akhir (mmol/mL)	$[CO_3^{2-}]$ rata-rata (mmol/mL)
303.15	2	5.85	6	2	0.06	2.34	2.17
308.15	2	5.85	6	2	0.06	2.34	2.17
313.15	2	5.85	5.95	2	0.04	2.34	2.17
318.15	2	5.9	6.05	2	0.06	2.36	2.18
323.15	2	5.9	6.05	2	0.06	2.36	2.18
328.15	2	5.9	6.05	2	0.06	2.36	2.18

Tabel B.4 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan DEA murni

T (K)	Molaritas HCl (M)	Vol HCl (pp)	Vol HCl (mo)	$[CO_3^{2-}]$ awal (mmol/mL)	$[HCO_3^-]$ (mmol/mL)	$[CO_3^{2-}]$ akhir (mmol/mL)	$[CO_3^{2-}]$ rata-rata (mmol/mL)
303.15	2	5	5.05	2	0.06	2	2
308.15	2	5	5.05	2	0.06	2	2
313.15	2	5.05	5.1	2	0.04	2.02	2.01
318.15	2	5.05	5.1	2	0.06	2.02	2.01
323.15	2	5.1	5.15	2	0.06	2.04	2.02
328.15	2	5.1	5.15	2	0.06	2.04	2.02

B.2 Nilai Konstanta Henry

Tabel B.5 Data perhitungan konstanta Henry pada berbagai variabel suhu

T(K)	$(-\frac{d \ln Kh}{d(1/T)})$	$((\frac{1}{T}) - (\frac{1}{298}))$	$\text{EXP}((-\frac{d \ln Kh}{d(1/T)}) \times ((\frac{1}{T}) - (\frac{1}{298})))$	He_{298}	$He^{\circ}t(\text{mol/cm}^3.\text{atm})$	$(\text{m}^3.\text{pa}/\text{kmol})$
303.	-5.70077E-05	-	0.882129063	-	3.17566E-05	3148947.125
308.	-0.000110532	-	0.784138071	0.000036	2.8229E-05	3542460.036
313.	0.000162347	-	0.699658346	-	2.51877E-05	3970191.731
318.	0.000212533	-	0.626520914	-	2.25548E-05	4433655.314
323.	0.000261167	-	0.562948895	-	2.02662E-05	4934333.829
328.	0.000308318	-	0.507479364	-	1.82693E-05	5473676.32

B.3 Hasil Perhitungan Diffusivitas

Tabel B.6 Hasil perhitungan Diffusivitas

T (K)	DAL($\text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$) (m^2/det)	DAG($\text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{N}_2$) (m^2/det)	DAL($\text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$) (m^2/det)
303.15	2.310×10^{-9}	1.719×10^{-5}	1.044×10^{-9}
308.15	2.601×10^{-9}	1.769×10^{-5}	1.062×10^{-9}
313.15	2.913×10^{-9}	1.819×10^{-5}	1.079×10^{-9}
318.15	3.241×10^{-9}	1.870×10^{-5}	1.096×10^{-9}
323.15	3.589×10^{-9}	1.922×10^{-5}	1.113×10^{-9}
328.15	3.953×10^{-9}	1.975×10^{-5}	1.131×10^{-9}

B.4 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa

Tabel B.7 Hasil perhitungan koeffisien perpindahan massa sisi gas pada temperatur 303.15 K - 328.15K

T (K)	Sc	Re	Sh	kg (kmol/s.m ² .Pa)
303.15	0.8036	709.24	44.41	2.330×10^{-8}
308.15	0.8038	689.03	43.34	2.302×10^{-8}
313.15	0.8044	669.44	42.32	2.275×10^{-8}
318.15	0.8053	650.41	41.33	2.248×10^{-8}
323.15	0.8062	632.15	40.39	2.223×10^{-8}
328.15	0.8072	614.67	39.47	2.198×10^{-8}

Tabel B.8 Hasil perhitungan koefisien perpindahan massa sisi liquid pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor *glycine* (1; 2; 3 % berat)

Suhu (K)	K_L (kmol/s.m ²)		
	<i>glycine</i> (1% w/v)	<i>glycine</i> (2% w/v)	<i>glycine</i> (3% w/v)
303.15	0.000422628	0.000396843	0.000395633
308.15	0.000454122	0.000422795	0.000420004
313.15	0.000488304	0.000451035	0.000447167
318.15	0.000522539	0.000482739	0.000474279
323.15	0.000553299	0.000517544	0.000506701
328.15	0.000586585	0.000548482	0.000541901

Tabel B.9 Hasil perhitungan koefisien perpindahan massa sisi liquid pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% murni

Suhu (K)	K_L kmol/s.m ²)
303.15	0.000457498
308.15	0.000491713
313.15	0.000520515
318.15	0.000554438
323.15	0.000586979
328.15	0

B.5 Laju Absorbsi, Waktu Kontak Absorbsi CO₂ dan C_{Ae}

Tabel B.10 Hasil perhitungan laju absorpsi, waktu kontak dan C_{Ae} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor glycine (1; 2; 3 % berat)

Suhu (K)	Laju absorpsi, q (kmol/det)			Waktu kontak (detik)			C _{Ae} (mmol/mL)		
	glycine (1% w/v)	glycine (2% w/v)	glycine (3% w/v)	glycine (1% w/v)	glycine (2% w/v)	glycine (3% w/v)	glycine (1% w/v)	glycine (2% w/v)	glycine (3% w/v)
303.15	0.00000046	0.00000080	0.00000093	0.29411577	0.31282445	0.31338	0.000000346	0.00000018	0.00000018
308.15	0.00000060	0.00000086	0.00000093	0.29348189	0.31000351	0.31226	0.00000085	0.00000018	0.00000018
313.15	0.00000060	0.00000086	0.00000100	0.28565195	0.30886063	0.31113	0.000000192	0.00000008	0.00000008
318.15	0.00000066	0.00000086	0.00000100	0.28157065	0.30420227	0.30943	0.00000085	0.00000008	0.00000018
323.15	0.00000066	0.00000086	0.00000100	0.27983465	0.29878505	0.30479	0.00000085	0.00000002	0.00000001
328.15	0.00000073	0.00000086	0.00000100	0.27701141	0.29568861	0.29909	0.00000021	0.00000002	0.00000001

Tabel B.11 Hasil perhitungan laju absorpsi, waktu kontak dan C_{Ae} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% murni

Suhu (K)	Laju absorpsi, q (kmol/det)	Waktu kontak (detik)	C_{Ae} (mmol/mL)
303.15	0.00000027	0.290271	0.0000000220
308.15	0.00000027	0.285316	0.0000000220
313.15	0.00000033	0.284305	0.0000000219
318.15	0.00000033	0.280879	0.0000000219
323.15	0.00000040	0.27843	0.0000000217
328.15	0.00000040	0.275578	0.0000000217

B.6 Hasil Perhitungan Konsentrasi CO_2 dalam Interface (C_{Ai}) dan Konstanta Kecepatan Reaksi Overall Pseudo First Order (k_{ov})

Tabel B.12 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor *glycine* (1% berat)

T (K)	P (Pa)	C_{Ai}	ϕ	k_{ov}
303.15		0.00476041	0.025824868	288638.9087
308.15		0.003782936	0.041780745	670926.1928
313.15	20265.000	0.003354733	0.04711534	761978.1115
318.15		0.002809523	0.06250769	1205391.715
323.15		0.002506141	0.070074836	1367965.33
328.15		0.002096818	0.092127484	2146815.606

Tabel B.13 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor *glycine* (2% berat)

T (K)	P (Pa)	C_{Ai}	ϕ	k_{ov}
303.15		0.003564	0.059132855	1513339.469
308.15		0.002922	0.078141459	2346850.451
313.15		0.002577	0.088587053	2693756.576
318.15	20265.000	0.002281	0.100081988	3090104.437
323.15		0.002026	0.112689185	3537654.209
328.15		0.001805	0.12648636	4046725.159

Tabel B.14 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor *glycine* (3% berat)

T (K)	P (Pa)	C_{Ai}	ϕ	k_{ov}
303.15		0.003085	0.07969	2748444.978
308.15		0.002706	0.090847	3172056.205
313.15	20265.000	0.002188	0.120376	4973926.165
318.15		0.001929	0.136575	5754413.156
323.15		0.001706	0.154446	6645143.272
328.15		0.001513	0.174121	7668669.041

Tabel B.15 Hasil perhitungan C_A dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA(30%) murni

T (K)	P (Pa)	C_A	ϕ	k_{ov}
303.15		0.005478	0.012822	71156.78088
308.15		0.004859	0.014455	80312.59403
313.15	20265.000	0.004132	0.021249	154982.1461
318.15		0.00369	0.023795	174674.971
323.15		0.003146	0.033488	312406.9655
328.15		0.002827	0.037278	351489.7783

B.7 Hasil Perhitungan $k_{glycine}$

Tabel B.16 Hasil perhitungan $k_{glycine}$ temperatur 303,15 K – 328,15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor glycine (1; 2; 3 % berat)

Suhu (K)	$k_{glycine}$ (det ⁻¹)		
	glycine (1% w/w)	glycine (2% w/w)	glycine (3% w/w)
303.15	2748305	1513199.904	2748305
308.15	3171857	2346651.049	3171857
313.15	4973644	2693474.909	4973644
318.15	5754020	3089710.864	5754020
323.15	6644599	3537109.934	6644599
328.15	7667924	4045979.875	7667924

B.8 Hasil Perhitungan Bilangan Hatta (Ha) dan *Enhancement factor* (*Ei*)

Tabel B.17 Hasil perhitungan bilangan Hatta (Ha) dan *Enhancement factor* (*Ei*) pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor *glycine* (1; 2; 3 % berat)

Suhu (K)	Ha			1/2 <i>Ei</i>		
	<i>glycine</i> (1% berat)	<i>glycine</i> (2% berat)	<i>glycine</i> (3% berat)	<i>glycine</i> (1% berat)	<i>glycine</i> (2% berat)	<i>glycine</i> (3% berat)
303.15	61.10545234	149.0081	201.4243	142.011618	189.4383	218.7082
308.15	92.00341673	184.8213	216.2997	169.6841053	219.4679	236.864
313.15	96.48767817	196.4083	269.1977	182.2674779	237.0135	278.9759
318.15	119.623057	207.3212	287.9624	207.8901653	255.8423	302.4045
323.15	126.6492028	217.7382	304.8069	223.1734919	275.8639	327.4737
328.15	157.0574183	230.6115	321.3158	256.0310105	297.2864	354.46



FINAL PROJECT– TK091383

KINETIC STUDY OF CARBON DIOXIDE ABSORPTION INTO GLYCINE PROMOTED DIETHANOLAMINE (DEA)

Presented By :
MARIA HESTIA INTAN C
NRP. 2311100045

KARTIKA ARSI
NRP. 2311100202

Adviser :
Dr. Ir. Susianto, DEA
NIP.1962 08 20 1989 03 1004
Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc
NIP. 1951 08 04 1974 12 1001

CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2015

LEMBAR PENGESAHAN

Studi Kinetika Absorpsi Karbodioksida *Diethanolamine* (DEA) Berpromotor Senyawa Glycine

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

Oleh :

Maria Hestia Intan C 2311 100 045
Kartika Arsi 2311 100 202

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr.Ir. Susianto, DEA  (Pembimbing 1)
2. Prof.Dr.Ir. Ali Altway, MS  (Pembimbing 2)
3. Ir. Nuniek Hendrianie, M.T  (Penguji I)
4. Fadlilatul Taufany S.T, Ph.D  (Penguji II)
5. Dr. Yeni Rahmawati S.T, M.T  (Penguji III)



Surabaya
Juli, 2015

STUDI KINETIKA ABSORPSI KARBON DIOKSIDA MENGGUNAKAN LARUTAN DIETHANOLAMINE (DEA) BERPROMOTOR GLYCINE

Mahasiswa : Maria Hestia Intan.C(2311100045)
Kartika Arsi (2311100202)

Pembimbing I : Dr. Ir. Susianto, DEA

Pembimbing II : Prof. Dr. Ali Altway, M.Sc

ABSTRAK

Dalam dunia industri, khususnya industri petrokimia dan minyak gas alam pada prosesnya diperlukan pemisahan gas CO₂ dimana gas ini merupakan gas yang korosif (*acid gas*). Sifat ini dapat merusak bagian dalam utilitas pabrik dan sistem perpipaannya serta mengurangi nilai kalor dari gas alam. Sifat korosif CO₂ akan muncul pada daerah dimana terdapat penurunan temperatur dan tekanan, seperti pada bagian elbow pipa, *tubing*, *cooler* dan injektor turbin. Dari kerugian seperti yang dijelaskan di atas, maka perlu dilakukan proses pemisahan CO₂ dari aliran gas, salah satu cara untuk menghilangkan CO₂ dari aliran gas adalah absorpsi reaktif menggunakan pelarut berbasis alkanolamine yang berkatalis. Oleh karena itu, dilakukan penelitian ini untuk menentukan data kinetika reaksi absorpsi CO₂ dalam larutan *diethanolamine* (DEA) dengan menggunakan promotor *glycine*. Pemilihan *glycine* sebagai promotor dikarenakan *glycine* merupakan senyawa amine primer yang bersifat reaktif, selain itu *glycine* mempunyai ketahanan terhadap suhu tinggi sehingga tidak mudah terdegradasi sesuai untuk diaplikasikan di dunia industri. Metode yang digunakan adalah absorpsi menggunakan peralatan *wetted wall column* skala laboratorium pada tekanan 1 atm. Dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi data kinetika reaksi sebagai upaya untuk mengoptimalkan proses pemisahan karbon dioksida di dunia industri. Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah bahwa

kenaikan temperatur dari 303,15 - 328,15 K akan meningkatkan laju absorpsi gas karbon dioksida berpromotor *glycine* sebesar 24,2% dan kenaikan konsentrasi promotor *glycine* dari 1% - 3% berat dalam larutan *diethanolamine* menghasilkan kenaikan laju absorpsi gas karbon dioksida sebesar 59,764% serta didapatkan persamaan konstanta kinetika reaksi *glycine* yaitu $1.419 \times 10^{12} \exp(-3634/T)$ ($\text{m}^3/\text{kmol.s}$). Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan *glycine* sebagai promotor dapat menambah laju absorpsi karbon dioksida pada larutan *diethanolamine* dan mampu menutupi kelemahan larutan *diethanolamine*.

Kata kunci: absorpsi, CO_2 , promotor, wetted wall column

KINETIC STUDY OF CARBON DIOXIDE ABSORPTION INTO GLYCINE PROMOTED DIETHANOLAMINE (DEA) SOLUTION

Mahasiswa : Maria Hestia Intan.C(2311100045)
Kartika Arsi (2311100202)

Pembimbing I : Dr. Ir. Susianto, DEA

Pembimbing II : Prof. Dr. Ali Altway, M.Sc

ABSTRACT

In industry, especially petrochemical, oil and natural gas industry, required separation process of CO₂ gas which is a corrosive gas (acid gas). This characteristic can damage the plant utility and piping systems as well as reducing the caloric value of natural gas. Corrosive characteristic of CO₂ will appear in areas where there is a decrease in temperature and pressure, such as at the elbow pipe, tubing, cooler and injector turbine. From disadvantages as described above, then it is important to do separation process in the CO₂ gas stream, one of the method for remove CO₂ from the gas stream is reactive absorption using alkanolamine based solution with promotor. Therefore, this study is done to determine the kinetics constant of CO₂ absorption in *diethanolamine* (DEA) solution using a *glycine* promoter. *Glycine* is chosen as a promoter because *glycine* is a primary amine compound which is reactive, moreover, *glycine* has resistance to high temperatures so it will not easy to degradable and suitable for application in industry. The method used in this study is absorption using laboratory scale *wetted wall column* equipment at atmospheric of pressure. This study will to provide the reaction kinetics data information in order to optimize the separation process of CO₂ in the industrialized world. The experimental results show that rising temperatures from 303,15 – 328,15 K and the increase of concentration of *glycine* from 1% - 3% weight will increase the absorption rate of carbon dioxide in DEA promotored

with *glycine* by 24,2% and 59,764% respectively, also the reaction kinetic constant is $1.419 \times 10^{12} \exp(-3634/T)$ ($\text{m}^3/\text{kmol.s}$). This result show that the addition of *glycine* as a promoter can increase absorption rate of carbon dioxide in *diethanolamine* solution and cover the weaknesses of *diethanolamine* solution.

Keywords: absorption, CO₂, promoter, wetted wall column

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami sampaikan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena hanya dengan rahmat dan berkah-Nya kami dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul :

”STUDI KINETIKA ABSORPSI KARBON DIOKSIDA MENGGUNAKAN LARUTAN *DIETHANOLAMINE* BERPROMOTOR *GLYCINE*”

Skripsi ini merupakan persyaratan kelulusan Program Studi S-1 di Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada kesempatan ini kami menyampaikan banyak terima kasih kepada :

1. Bapak Prof.Dr.Ir.Tri Widjaja, M.Eng, selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS
2. Bapak Dr. Ir. Susianto, DEA selaku dosen Pembimbing I yang telah memberikan banyak masukan bagi kami.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc selaku Kepala Laboratorium Perpindahan Panas Massa dan Pemisahan serta dosen Pembimbing II kami.
4. Bapak Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D, Ibu Yeny Rahmawati, ST., MT. dan Ibu Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D selaku dosen Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa.
5. Bapak Ashari dan Bapak Dwi Satriyo A. dari PT. Petrokimia Gresik atas bantuannya untuk menyediakan sampel bahan *Diethanolamine*.
6. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Kimia FTI – ITS.
7. Kedua orang tua kami dan keluarga yang telah banyak memberikan dukungan moral, spiritual, dan material.
8. Rekan-rekan seperjuangan dari laboratorium Perpindahan Panas Massa dan Pemisahan Teknik Kimia FTI-ITS, terutama arek-arek LTD MANIA (Deffry-Pendi, Pranata-Rydh, Ardhiya-BobbyR, Nadia-Dimas, Binsar-Fadlan)

9. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini.

Kami menyadari materi yang kami sajikan ini masih jauh dari sempurna oleh karena itu kami sangat mengharapkan saran dan masukan yang konstruktif demi kesempurnaan laporan ini.

Surabaya, 15 Juni 2015

Penyusun

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	
BAB I PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	5
I.3 Tujuan Penelitian	6
I.4 Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 Karbon Dioksida	7
II.2 Metode Pemisahan Karbon Dioksida	9
II.3 Pemilihan Pelarut	11
II.4 Kinetika Reaksi Absorpsi Karbon Dioksida	14
II.5 Absorpsi Karbodioksida dalam <i>Wetted Wall Column</i>	16
II.6 Regim Reaksi	19
II.7 Kelarutan Gas dalam Cairan	20
II.8 Penelitian Terdahulu	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
III.1 Deskripsi Penelitian	24
III.2 Bahan Penelitian dan Peralatan Penelitian	24
III.3 Kondisi Operasi dan Variabel Penelitian	28
III.4 Prosedur Penelitian	29
III.5 Evaluasi Data	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
IV.1 Pengaruh Kenaikan Suhu Terhadap Laju Absorpsi Kabon Dioksida	35
IV.2 Pengaruh Konsentrasi Promotor Terhadap Laju Absorpsi Karbon Dioksida	36

**IV.3 Kereaktifan Promotor *Glycine* pada Absorpsi
Karbon Dioksida**

37

BAB V KESIMPULAN	40
DAFTAR PUSTAKA	xii
DAFTAR NOTASI	xvi
APPENDIKS A	A-1
APPENDIKS B	B-1
LAMPIRAN	

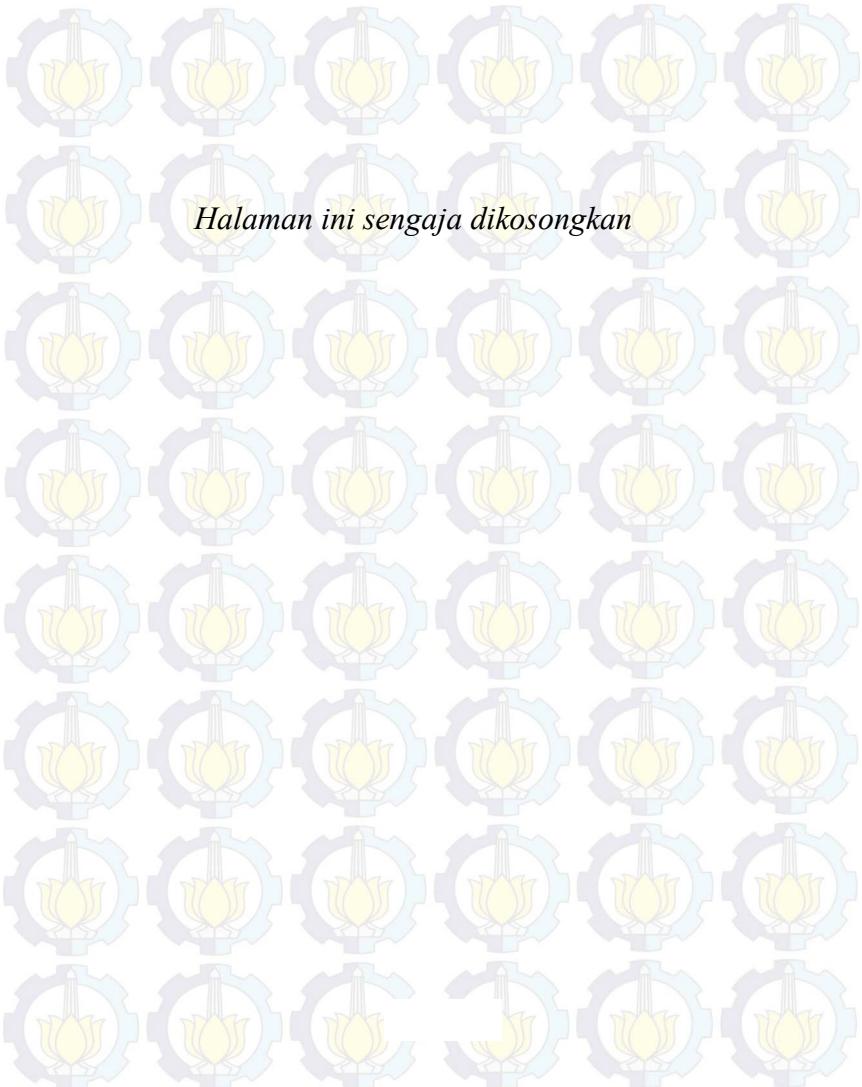
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi Batas Konsentrasi Gas Karbodioksida dalam Proses Industri	7
Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu	22
Tabel 4.1 Perbandingan Persamaan Konstanta Reaksi Absorpsi Karbon Dioksida Berbagai Macam Pelarut	39
Tabel A.1 Data kalibrasi rotameter liquid	A-1
Tabel A.2 Data volume HCl sebagai penitran dalam titrasi	A-2
Tabel A.3 Data Perhitungan Konsentrasi <i>Glycine</i> dan Konstanta Kecepatan Reaksi Apparent	A-15
Tabel A.4 Data konstanta kecepatan reaksi <i>glycine</i> pada suhu 303.15 K-328.15 K	A-19
Tabel B.1 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan promotor <i>glycine</i> pada konsentrasi 1% berat	B-1
Tabel B.2 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan promotor <i>glycine</i> pada konsentrasi 2% berat	B-2
Tabel B.3 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan promotor <i>glycine</i> pada konsentrasi 3% berat	B-3
Tabel B.4 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan DEA murni	B-4
Tabel B.5 Data perhitungan konstanta Henry pada berbagai variabel suhu	B-5
Tabel B.6 Hasil perhitungan Diffusivitas 303.15 K -328.15 K	B-6
Tabel B.7 Hasil perhitungan koefisien perpindahan massa sisi gas pada temperatur 303.15 K -328.15K	B-7
Tabel B.8 Hasil perhitungan koefisien perpindahan massa sisi liquid pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor <i>glycine</i> (1; 2; 3 % berat)	B-8
Tabel B.9 Hasil perhitungan koefisien perpindahan massa sisi liquid pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% murni	B-9
Tabel B.10 Hasil perhitungan laju absorpsi, waktu kontak dan C_{Ae} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor <i>glycine</i> (1; 2; 3 % berat)	B-10

Tabel B.11 Hasil perhitungan laju absorpsi, waktu kontak dan C_{Ae} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% murni	B-11
Tabel B.12 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor <i>glycine</i> (1% berat)	B-12
Tabel B.13 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor <i>glycine</i> (2% berat)	B-13
Tabel B.14 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor <i>glycine</i> (3% berat)	B-14
Tabel B.15 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA(30%) murni	B-15
Tabel B.16 Hasil perhitungan $k_{glycine}$ temperatur 303,15 K – 328,15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor <i>glycine</i> (1; 2; 3 % berat)	B-16
Tabel B.17 Hasil perhitungan bilangan Hatta (Ha) dan <i>Enhancement factor</i> (Ei) pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor <i>glycine</i> (1; 2; 3 % berat)	B-17

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kenaikan Emisi Gas CO ₂	1
Gambar 2.1 Distribusi kecepatan <i>Wetted Wall Column</i>	18
Gambar 3.1 Kolom Absorpsi tipe <i>Wetted wall column</i>	26
Gambar 3.2 Skema Peralatan <i>Wetted wall column</i>	27
Gambar 4.1 Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absorpsi karbon dioksida dalam larutan <i>diethanolamine</i> (DEA) berpromotor <i>glycine</i> pada suhu 303.15 K – 328.15 K	35
Gambar 4.2 Peningkatan laju absorpsi tiap konsentrasi promotor pada suhu 303.15 K – 328.15 K	36
Gambar 4.3 Hubungan ln k vs 1/T pada laju absorpsi karbon dioksida dalam larutan <i>diethanolamine</i> berpromotor <i>glycine</i> pada suhu 303.15 K – 328.15 K	38
Gambar A.1 Kalibrasi Rotameter liquid	A-1
Gambar A.2 Pembacaan Keadaan Steady State	A-3
Gambar A.3 Hubungan k_{app} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 303.15 K	A-16
Gambar A.4 Hubungan k _{glycine} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 308.15 K	A-17
Gambar A.5 Hubungan k _{glycine} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 313.15 K	A-17
Gambar A.6 Hubungan k _{glycine} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 318.15 K	A-18
Gambar A.7 Hubungan k _{glycine} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 323.15 K	A-18
Gambar A.8 Hubungan k _{glycine} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 328.15 K	A-19
Gambar A.9 Hubungan ln k _{glycine} dengan 1/T pada persamaan <i>Arhenius</i>	A-20



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR NOTASI

A	<i>Pre-exponensial factor</i>
B_F	Tebal film (m)
C_{B0}	Konsentrasi awal reaktan (kmol m ⁻³)
C_A	Konsentrasi gas CO ₂ dalam badan cairan (kmol m ⁻³)
C_{Ai}	Konsentrasi gas CO ₂ dalam interface (kmol m ⁻³)
C_{Ae}	Konsentrasi gas CO ₂ berkesetimbangan dalam cairan (kmol m ⁻³)
C_i	Konsentrasi ion yang valensinya Zi (kmol m ⁻³)
d	diameter pipa yang dialiri liquida (m)
D_{AG}	Koefisien difusi gas CO ₂ (m ² det ⁻¹)
D_{AL}	Diffusivitas CO ₂ dalam H ₂ O, (m ² /det ⁻¹)
D_{BL}	Diffusivitas CO ₃ ²⁻ dalam H ₂ O, (m ² det ⁻¹)
E	Energi aktivasi (kg m ⁻² det ²)
E_i	<i>Enhancement factor</i>
g	percepatan gravitasi (m s ⁻²)
h	tinggi kolom (m)
h	Kekuatan ionic total larutan (m ³ /kmol)
h_+, h_-, h_G	Kontribusi ion positif, negatif dan gas terhadap faktor kelarutan (m ³ kmol ⁻¹)
Ha	Bilangan Hatta
He	Konstanta Henry (Pa m ³ kmol ⁻¹)

He^0	Konstanta Henry untuk sistem gas-cair ($\text{Pa m}^3 \text{ kmol}^{-1}$)
I	Kekuatan Ionik larutan (ion m^{-3})
k_{app}	$k_{\text{ov}} - k_{\text{OH}} - [\text{OH}] - k_{\text{DEA}} [\text{DEA}] (\text{det}^{-1})$
k_{ov}	Konstanta kecepatan reaksi <i>overall pseudo first order</i> (det^{-1})
k_{OH}	Konstanta laju reaksi dari reaksi (2.11) (det^{-1})
$k_{\text{H}_2\text{O}}$	Konstanta laju reaksi dari reaksi (2.10) (det^{-1})
k_{glycine}	Konstanta kecepatan reaksi untuk <i>glycine</i> ($\text{m}^3/\text{kmol.s}$)
$k_{\text{app glycine}}$	$k_{\text{glycine}} [\text{glycine}] (\text{det}^{-1})$
k_g	Koefisien perpindahan massa sisi gas ($\text{kmol m}^{-2} \text{ det}^{-1}$)
k_L	Koefisien perpindahan massa sisi cairan, ($\text{kmol m}^{-2} \text{ det}^{-1}$)
K_{DEA}	Konstanta reaksi <i>Diethanolamine</i> (DEA)
K_1	Konstanta equilibrium ionisasi pertama dari asam karbonat (kmol m^{-3})
K_2	Konstanta equilibrium ionisasi kedua dari asam karbonat (kmol m^{-3})
K_w	Konstanta ionisasi air ($\text{kmol}^2 \text{ mol}^{-6}$)
K_{eq}	Konstanta equilibrium ionisasi pertama H_2O dengan carbamate (kmol m^{-3})
K_c	Konstanta equilibrium ionisasi DEA dengan karbondioksida (kmol m^{-3})
K_b	Konstanta equilibrium ionisasi kedua H_2O dengan carbamate (kmol m^{-3})

M_B	Berat molekul pelarut (kg mol^{-1})
M_w	Berat molekul air (kg mol^{-1})
P_A	Tekanan parsial CO_2 (Pa)
P_{Ai}	Tekanan parsial CO_2 pada <i>interface</i> (Pa)
q	Laju absorpsi total (kmol det^{-1})
Q	Jumlah gas yang terabsorpsi (kmol m^{-2})
r_{ov}	Kecepatan reaksi overall ($\text{kmol m}^3 \text{det}$)
R	Konstanta gas ($\text{m}^3 \text{Pa kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$)
\bar{R}	Laju absorpsi per satuan luas setelah waktu kontak t ($\text{kmol m}^{-2} \text{det}^{-1}$)
R	Kecepatan reaksi gas ($\text{kmol m}^{-3} \text{det}^{-1}$)
Re	<i>Reynold number</i>
Sc	<i>Schmidt number</i>
Sh	<i>Sherwood number</i>
t_c	Waktu kontak gas terhadap permukaan (det)
T	Temperatur (K)
U	Distribusi kecapatan film liquid (m det^{-1})
U_s	Kecepatan di permukaan film (m det^{-1})
V_A	Volume molar (liter mol^{-1})
V	Laju alir liquida ($\text{m}^3 \text{det}^{-1}$)
x	Jarak dari permukaan film cairan (m)
Zi	valensi ion

Z Koefisien mol reaktan yang bereaksi dengan 1 mol gas terlarut

Huruf Latin

δ Tebal *film* cairan (m)

ρ densitas liquida (kg m^{-3})

μ viskositas liquida ($\text{kg m}^{-1} \text{ det}^{-1}$)

φ Parameter asosiasi pelarut

Γ *Mass velocity liquid* (kg/m.s)

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Maria Hestia Intan Ciptorini dilahirkan di Tabanan yang terletak di Propinsi Bali, pada tanggal 30 April 1993, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuhnya yaitu dimulai di SDK St. Maria Immaculata Tabanan, SMPN 1 Tabanan, dan SMAN 1 Tabanan. Pada jenjang perkuliahan penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan Teknik Kimia angkatan 2011. Penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, dan selanjutnya melakukan penelitian dengan judul **“Studi Kinetika Absorpsi Karbodioksida Menggunakan Larutan Diethanolamine (DEA) Berpromotor Glycine”**

Data Pribadi Penulis

Nama	:	Maria Hestia Intan Ciptorini
Tempat Tanggal lahir	:	Tabanan, 30 April 1993
Alamat	:	Perum. Tanah Bang Permai Blok C-7 Kediri – Tabanan - Bali
Telp	:	081232561431
Email	:	maria.hestia@yahoo.com

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Kartika Arsi, penulis dilahirkan di Kota Jakarta yang terletak di Propinsi DKI Jakarta, pada tanggal 12 Januari 1994, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuhnya yaitu dimulai di SDN 03 pagi Cipayung, SMPN 09 Jakarta Timur, dan SMAN 39 Jakarta. Pada jenjang perkuliahan penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan Teknik Kimia angkatan 2011. Penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, dan selanjutnya melakukan penelitian dengan judul **“Studi Kinetika Absorpsi Karbondioksida Menggunakan Larutan Diethanolamine (DEA) Berpromotor Glycine”**

Data Pribadi Penulis

Nama	:	Kartika Arsi
Tempat Tanggal lahir	:	Jakarta, 12 Januari 1994
Alamat	:	KAV.DKI Cipayung Jl.Flora No.3
Telp	:	082219076919
Email	:	Kartikarsi@hotmail.com

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Pada masa sekarang emisi gas karbon dioksida atau CO₂ sangat diperhatikan oleh berbagai pihak, baik dari industri sampai masyarakat awam. Kenaikan emisi CO₂ dari tahun 1990 – 2011 sangat signifikan dan dapat semakin meningkat ke depannya, seperti pada gambar berikut:



Gambar 1.1 Kenaikan emisi gas CO₂

Gas CO₂ dapat merusak bagian perpipaan dan utilitas pabrik karena sifat korosivitasnya. Sifat korosif CO₂ akan muncul pada daerah dimana terdapat penurunan temperatur dan tekanan, seperti pada bagian elbow pipa, tubing, cooler dan injektor turbin. Selain itu, gas CO₂ juga dapat mengurangi nilai kalor dari gas alam. Dimana dalam fasilitas turbin, CO₂ akan mengakibatkan penurunan nilai kalor panas akibat CO₂ dan H₂O merupakan produk dari pembakaran. Pada LNG (*Liquified Natural Gas*), gas CO₂ harus dihilangkan, karena dapat membeku pada suhu rendah yang mengakibatkan penyumbatan pada system perpipaan dan

tubing pada *heat exchanger*. Pada industri amoniak, CO₂ merupakan racun pada katalis sintesa amoniak, oleh karena itu CO₂ harus dipisahkan sebelum memasuki unit sintesa amoniak (Tan, 2010).

Selain itu, penumpukan gas karbon dioksida di atmosfer dapat menimbulkan efek rumah kaca yang mengakibatkan pemanasan global. Penumpukan gas karbon dioksida di atmosfer ini sebagian besar disebabkan oleh emisi gas CO₂ dari berbagai industri akibat proses pembakaran dan proses-proses kimia lainnya. Menurut UNEP (2005), konsentrasi keseluruhan gas karbon dioksida di atmosfer selalu bertambah. Pada tahun 1860 konsentrasi gas karbon dioksida mendekati 280 ppmv, tahun 1958 mendekati 316 ppmv, dan tahun 2011 dengan cepat mencapai nilai 369 ppmv. Dan diprediksi konsentrasi akan terus meningkat hingga di atas 750 ppmv hingga tahun 2100 jika tidak ada upaya mengatasi kerugian yang ditimbulkan oleh gas karbon dioksida. *Carbon capture and storage* (CCS) merupakan salah satu upaya untuk mengatasi emisi gas karbon dioksida dari industri, mulai dari pemisahan karbondioksida, transportasi dan penyimpanannya (IPCC, 2005; Wang, dkk 2011).

Melihat besarnya kerugian yang dapat ditimbulkan oleh gas karbon dioksida, maka penting dilakukan proses pemisahan gas karbon dioksida dari aliran gas. Rao dan Rubin (2002), mengemukakan ada beberapa teknologi untuk memisahkan dan menangkap karbon dioksida seperti : proses absorpsi secara fisik dan kimia, proses adsorpsi, proses *cryogenic* (pendinginan), teknologi membran dan menggunakan sistem alga atau mikroba. Teknologi pemisahan karbon dioksida yang ekonomis, telah dikembangkan dengan baik dan telah diaplikasikan pada berbagai proses komersial adalah proses absorpsi secara kimia.

Proses absorpsi kimia merupakan proses pemisahan gas menggunakan pelarut dengan reaktan yang dapat bereaksi dengan komponen gas yang terlarut dan sering dijumpai dalam dunia industri, seperti pada industri amoniak, *petroleum chemical plants*, dan gas alam. Tujuan dari proses absorpsi dalam industri adalah untuk memisahkan komponen dari campuran gas atau untuk menghasilkan suatu produk reaksi, dan salah satu komponen dari campuran gas yang sering dipisahkan adalah gas karbon dioksida (CO_2). Penggunaan pelarut kimia dimaksudkan untuk meningkatkan pelarut dalam menyerap gas karbon dioksida. Beberapa jenis pelarut yang sering digunakan adalah pelarut organik seperti sulfinol; kalium karbonat (K_2CO_3); dan senyawa alkanolamine seperti monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA), diisopropanolamine (DIPA), diglycolamine (DGA), triethanolamine (TEA), methyldiethanolamine (MDEA), 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) dan 2-piperidineetanol (2-PE).

Keunggulan dari pelarut alkanolamine dalam menyerap gas karbon dioksida adalah laju absorpsi cepat dan biaya pelarut murah. Namun terdapat beberapa kelemahan senyawa amine seperti panas absorpsi tinggi, tidak dapat memisahkan senyawa-senyawa mercaptan, konsumsi energi untuk regenerasi pelarut cukup tinggi, dan bersifat korosif.

Pada penelitian ini digunakan larutan *Diethanolamine* (DEA) dengan promotor *Glycine* (GLY). Larutan DEA yang merupakan amine sekunder, digunakan karena memiliki beberapa keuntungan yaitu memiliki kecepatan reaksi dengan karbon dioksida yang lebih cepat dibanding MDEA serta lebih tidak mudah terurai dibanding MEA. Namun larutan DEA ini memiliki kekurangan yaitu membutuhkan energi yang cukup besar untuk meregenerasi, dapat terdegradasi karena oksigen dan memiliki volatilitas yang

tinggi. Maka dari itu digunakan *glycine* (GLY) sebagai promotor. Penggunaan *glycine* ini karena memiliki penampakan seperti air (tidak *volatile*, viskositas dan *surface tension* yang mirip dengan air), mempunyai stabilitas tinggi terhadap oksigen sehingga tidak mudah terdegradasi oleh oksigen serta memiliki kecepatan reaksi dengan karbon dioksida yang tinggi pula dan dapat menaikkan laju reaksi DEA tanpa menghilangkan keuntungan dari penggunaan larutan DEA itu sendiri (Portugal dkk, 2008).

Adapun beberapa penelitian-penelitian terdahulu yang mengkaji kinetika reaksi absorpsi kedalam larutan K_2CO_3 dengan berbagai jenis promotor diantaranya yang telah dilakukan Blauwhoff (1983) yang melakukan penelitian tentang studi reaksi antara CO_2 dan alkanolamine dalam *aqueous solution* yang mendapatkan bahwa DEA dan *diisopropylamine* (DIPA) masing-masing sangat cocok sebagai absorben untuk gas CO_2 . Penelitian ini juga mendapatkan persamaan kecepatan reaksi untuk sistem ini. Yih dan Sun (1986) mempelajari absorpsi hidrogen sulfida dan karbon dioksida dalam larutan kalium karbonat dengan atau tanpa promotor amine (DEA dan DIPA) masing-masing pada suhu $22-80^{\circ}C$ menggunakan peralatan *wetted wall column*.

Lin (1999) mempelajari tentang karakteristik performa dan modeling dari absorpsi CO_2 oleh amine dalam packed kolom. Penelitian lain juga telah dilakukan oleh Brouwer (2005) mengenai *Amino-acid Salt* untuk menangkap CO_2 dari flue gas dimana larutan *amino acid salt* dapat secara baik digunakan untuk menngkap CO_2 karena memiliki resitensi yang baik terhadap oksigen dan kinetika reaksi yang cepat.

Penelitian yang dilakukan oleh Xu dkk, (2003) melakukan penelitian mengenai absorpsi gas CO_2 dalam larutan MDEA dengan menambahkan Piperazine (PZ) dan DEA. Hasil penelitian ini menunjukan *activation effect* dari masing-masing campuran

baik DEA, PZ, maupun PZ+DEA dalam proses absorpsi CO₂ ini dihasilkan dari hasil variasi rate CO₂, transport PZ dan DEA menuju MDEA, serta *regeneration rate* dari PZ dan DEA.

Aronu (2010) telah melakukan penelitian untuk menginvestigasi *amine amino acid salt* (AAAS) untuk absorpsi CO₂ dan mendapat kesimpulan bahwa performa *amine amino acid salt* hampir sama dengan *monoethanolamine* (MEA) dalam kemampuan mengabsorpsi CO₂.

Rowland (2011) menggunakan *glycine* sebagai salah satu aktivator absorpsi CO₂, menjelaskan bahwa tingkat penyerapan CO₂ dengan *glycine* meningkat dan memiliki reaksi dengan CO₂ yang lebih cepat daripada amonia. Dikarenakan *glycine*, suatu asam amino, mampu membentuk karbamat dan juga menerima proton. Dan *glycine* juga merupakan golongan senyawa amine primer yang mempunyai kemampuan absorpsi CO₂ lebih baik dibanding dengan TEA yang merupakan golongan senyawa amine tersier (Ullmann, 2005). Serta *glycine* memiliki daya tahan pada suhu tinggi yang baik sehingga tidak mudah terdegradasi oleh panas.

I.2 Perumusan Masalah

Penelitian – penelitian sebelumnya mengenai absorpsi CO₂ dan konstanta kinetika reaksi telah banyak dilakukan, baik menggunakan absorben larutan DEA maupun karbonat dengan beberapa promotor, seperti MDEA, MEA, asam borat, dan *piperazine*, tetapi penentuan kinetika reaksi dengan promotor senyawa amine seperti *glycine* untuk larutan DEA masih belum pernah dilakukan, sehingga pada penelitian ini dilakukan penelitian absorpsi CO₂ dalam larutan DEA menggunakan promotor tersebut pada peralatan *wetted wall column* skala laboratorium pada tekanan 1 atmosfer.

Selain itu perlu dikaji secara teoritis kinerja *packed column* untuk absorpsi CO₂ menggunakan pelarut DEA dengan promotor *glycine*.

I.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan data kinetika reaksi absorpsi CO₂ dalam larutan DEA dengan promotor *glycine* pada kondisi operasi 1 atm dan suhu 303,15 – 328,15 K.

I.4 Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi data kinetika reaksi sebagai upaya untuk mengoptimalkan proses pemisahan karbon dioksida di dunia industri.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Bahan Baku (Karbon Dioksida)

Karbon dioksida adalah senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon. Berbentuk gas pada temperatur dan tekanan standar dan berada di atmosfer. Karbon dioksida termasuk oksida asam dan tidak berbentuk cair pada tekanan dibawah 5,1 atm tetapi berbentuk padat pada temperatur di bawah -78°C . Dalam bentuk padat, karbon dioksida disebut *dry ice*. Larutan karbon dioksida mengubah warna laksus dari biru menjadi merah muda (Septiawan, 2011).

Gas karbon dioksida di produksi hampir 97% dari hasil pembakaran bahan bakar fosil, seperti dari sumber batu bara, minyak, gas alam dan biomassa. Keberadaan karbon dioksida pada industri gas alam dapat menurunkan nilai *heating value* pada gas dan komponen asam dapat menyebabkan korosi pada peralatan. Pada pipa gas alam, kandungan karbon dioksida yang diizinkan sekitar 1-2% mol (Buckingham, 1964; Ma'mun, 2005).

Adanya karbon dioksida yang berlebihan dapat melubangi lapisan ozon, menyebabkan efek rumah kaca, dan pemanasan global. Salah satu indikator yang digunakan dalam menganalisa isu pemanasan global adalah bertambahnya gas rumah kaca, terutama gas karbon dioksida. Gas karbon dioksida yang keluar meninggalkan kolom harus memenuhi spesifikasi batas gas karbon dioksida, seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi Batas Konsentrasi Gas Karbon Dioksida dalam Proses Industri

Proses	Batas konsentrasi gas karbon dioksida
--------	---------------------------------------

Industri manufaktur	< 0,1% CO ₂
Industri amoniak	< 16 ppm CO ₂
Pemurnian gas alam :	
• Pipa gas	< 1% CO ₂
• Bahan baku LNG	< 50 ppm CO ₂
Sintesa gas untuk produksi kimia (H ₂ /CO)	< 500 ppm CO ₂
Gasifikasi batu bara	~500 ppm CO ₂
Industri etilen	~1 ppm CO ₂
Pembangkit tenaga listrik :	
• Pembangkit tenaga listrik NGCC	<0,5% CO ₂
• Pembangkit listrik batubara	<1,5% CO ₂

(Yildirim dkk, 2012)

Sejauh ini, berbagai upaya telah dilakukan untuk mengurangi dampak pemanasan global, seperti program penanaman kembali (reboisasi), penghematan energi, penggunaan energi baru dan terbarukan, dan pemanfaatan berbagai teknologi *carbon capture and storage* (CCS).

Carbon capture and storage (CCS) memungkinkan emisi karbon dioksida untuk dibersihkan dari aliran buangan pembakaran batu bara atau pembentukan gas dan dibuang sedemikian sehingga karbon dioksida tidak masuk ke atmosfer. Teknologi yang memungkinkan penangkapan karbon dioksida dari aliran emisi telah digunakan untuk menghasilkan karbon dioksida murni dalam industri makanan dan kimia. Setelah karbon dioksida ditangkap, penting bahwa karbon dioksida dapat disimpan secara aman dan permanen (Septiawan, 2011).

Selain memiliki beberapa efek negatif, karbon dioksida juga memiliki nilai ekonomis, diantaranya karbon dioksida digunakan dalam industri minuman berkarbonasi, *dry ice*, bahan baku pada industri urea, industri abu soda (Rao dan Rubin, 2002; Suda dkk, 1997).

II.2 Metode Pemisahan Karbon Dioksida

Rao dan Rubin (2002), mengungkapkan ada beberapa teknologi untuk memisahkan dan menangkap karbon dioksida seperti : proses *cryogenic* (pendinginan), teknologi membran, menggunakan sistem alga atau mikroba, adsorbsi, dan absorpsi.

Adsorbsi adalah proses pemisahan fluida (cairan maupun gas) yang terikat pada zat penyerap (adsorben) padatan dan akhirnya membentuk suatu *film* (lapisan tipis) pada permukaan padatan. Adsorben yang sering diaplikasikan pada proses penangkapan karbon dioksida adalah karbon aktif, alumina, dan zeolit. Proses adsorbsi jarang diaplikasikan pada proses gas buang karbondioksida, karena mempertimbangkan tantangan ketersediaan adsorben yang digunakan, selain itu selektivitas yang rendah akan berpengaruh pada pemisahan karbon dioksida dari aliran gas.

Membran merupakan metode pemisahan yang tidak membutuhkan zat kimia tambahan dan juga kebutuhan energinya sangat minimum. Membran dapat bertindak sebagai *filter* atau perangkat penghubung antara aliran gas dan cairan. Komponen-komponen akan terpisah berdasarkan ukuran dan bentuknya, dengan bantuan tekanan dan selaput *semi-permeable*. Hasil pemisahan berupa *retentate* (bagian dari campuran yang tidak melewati membran) dan *permeate* (bagian dari campuran yang melewati membran). Sehingga hanya molekul-molekul dengan ukuran tertentu saja yang bisa melewati membran sedangkan sisanya akan tertahan di permukaan membran. Efisiensi pemisahan teknologi membran tergantung pada tekanan parsial gas karbon dioksida. Dengan demikian, teknologi pemisahan menggunakan membran cocok untuk konsentrasi gas karbon

dioksida yang tinggi (di atas 20 vol%) seperti aliran gas buang dari proses *oxyfuel* dan *integrated gasification combined cycle* (IGCC).

Metode absorpsi adalah metode pemisahan yang paling ekonomis untuk memisahkan karbon dioksida dari aliran gas, sehingga pada penelitian kali ini yang digunakan ialah dengan metode absorpsi. Absorpsi karbon dioksida dengan larutan kimia atau fisika adalah teknologi yang dikembangkan dengan baik dan telah diaplikasikan pada berbagai proses komersial, termasuk pemurnian gas dan produksi amoniak. (Wang dkk, 2011).

Secara umum, proses absorpsi diawali dengan penyerapan gas ke dalam liquida melalui interface. Dikenal dua macam absorpsi, yaitu :

1. Absorpsi fisik

Proses absorpsi atau perpindahan gas (difusi) kedalam absorben tanpa disertai dengan reaksi kimia.

2. Absorpsi kimia

Pada proses ini, perpindahan gas (difusi) disertai dengan reaksi antara gas dan absorben. Reaksi kimia dapat terjadi secara *reversible* dan *irreversible* dengan reaksi orde satu, orde dua dan seterusnya tergantung dari jumlah molekul yang bereaksi yang konsentrasiannya berubah sebagai hasil dari reaksi kimia.

Absorpsi disertai dengan reaksi kimia telah mendapatkan perhatian yang serius dalam proses industry kimia. Proses absorpsireaktif (*Reactive Absorption Processes/ RAP*) adalah proses yang menggabungkan mekanisme reaks ikimia dan absorpsi dalam satu unit. Secara umum,absorpsi reaktif dikenal sebagai penyerapan gas dalam medium *liquid* dengan reaksi kimia. Proses tersebut memiliki beberapa keuntungan, dimana dalam proses tersebut dapat meningkatkan *yield* reaksi dan

selectivity, mengatasi hambatan thermodinamika seperti reduksi dalam konsumsi energy, air dan pelarut. Oleh karena adanya interaksi antara reaksi kimia dan perpindahan massa dan panas yang cukup kompleks (Gorak, 2005).

Perpindahan massa disertai reaksi kimia terjadi bila dua fasa tak berada dalam kesetimbangan kimia dikontakkan satu sama lain. Fenomena ini terdiri atas beberapa tahap elementer berikut:

- a. Difusi satu reaktan dari badan gas ke bidang batas antar fasa gas-liquida.
- b. Difusi reaktan dari interface ke badan fasa liquida.
- c. Reaksi kimia di dalam fasa liquida.
- d. Difusi reaktan yang semula ada di dalam badan fasa liquida, dan/atau produk reaksi didalam fasa liquida, akibat gradien konsentrasi yang terbentuk oleh reaksi kimia.

Proses perpindahan massa perlu disertai reaksi kimia untuk meningkatkan laju dan yield proses. Model-model perpindahan massa yang dijelaskan di muka dapat digunakan untuk mempelajari pengaruh reaksi kimia terhadap proses absorpsi. Kendatipun model-model tersebut bervariasi dalam menyajikan proses yang terjadi, seluruh model ini pada umumnya memberikan hasil perhitungan matematik yang bermanfaat dan umumnya lebih disukai untuk menggunakan model yang paling sederhana untuk suatu persoalan tertentu dari pada model yang paling realistik tapi kompleks.

II.3 Pemilihan Pelarut

Pemilihan pelarut umumnya dilakukan sesuai dengan tujuan absorpsi, antara lain :

1. Jika tujuan utama adalah untuk menghasilkan larutan yang spesifik, maka pelarut ditentukan berdasarkan sifat dari produk

2. Jika tujuan utama adalah untuk menghilangkan kandungan tertentu dari gas, maka ada banyak pilihan pelarut. Misalnya air, dimana merupakan pelarut yang paling murah dan sangat kuat untuk senyawa polar.

Terdapat beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan jenis pelarut, yaitu kelarutan gas, volatilitas, korosifitas, harga, ketersediaan, viskositas dll (Firdaus, 2011).

Pelarut alkanolamine telah digunakan sekitar 75 tahun untuk treatment industri gas (Booth, 2005; Wang dkk, 2011). Alkanolamine dapat diklasifikasikan menjadi tiga berdasarkan struktur kimianya, yaitu *primary amine*, *secondary amine* dan *tertiary amine*. *Primary amine* memiliki satu rantai alkanol dan dua atom hidrogen yang terikat atom nitrogen, contohnya adalah methylethanolamine (MEA). *Secondary amine* memiliki dua rantai atom alkanol dan satu atom hidrogen yang terikat atom nitrogen, contohnya adalah diethanolamine (DEA) dan triethanolamine (TEA). *Tertiary amine* tidak memiliki atom hidrogen, secara langsung terikat atom nitrogen, contohnya adalah methyltriethanolamine (MDEA) (Wang dkk, 2011; Yildirim dkk, 2012).

Keunggulan senyawa alkanolamine dalam menyerap gas karbon dioksida adalah laju absorpsi cepat dan biaya pelarut murah. Namun terdapat beberapa kelemahan senyawa amine seperti panas absorpsi tinggi, tidak dapat memisahkan senyawa-senyawa mercaptan, konsumsi energi untuk regenerasi pelarut cukup tinggi, dan bersifat korosif.

Perbedaan antara pelarut dan promotor, yaitu pelarut adalah suatu substansi yang dapat melarutkan bahan lain (*solute*) dengan menghasilkan suatu larutan (campuran *solvent* dan *solute*), sedangkan promotor adalah suatu bahan yang ditambahkan sebagai katalis untuk meningkatkan aktivitas reaksi atau

menambah selektivitas dari suatu pelarut. Biasanya pelarut memiliki kuantitas lebih besar dibanding dengan promotor dalam satu komponen.

Baru-baru ini asam amino telah diselidiki sebagai promotor karena memiliki kelompok gugus fungsional yang sama seperti amine dan dengan laju reaksi yang sama pula. Namun asam amino tahan terhadap degradasi oksidatif, bersifat non-volatile dan memiliki toksisitas yang rendah. Dalam larutan *aqueous*, asam amino terbentuk menjadi di tiga bentuk: asam, *zwitterionic* dan basa (atau bentuk terdeprotonasinya). Sebagai asam dan *zwitterionic*, asam amino kurang reaktif dengan CO₂, sedangkan bentuk terdeprotonasi dari asam amino lebih reaktif dan lebih disukai untuk penyerapan CO₂. Biaya asam amino seperti *glycine* juga sebanding dengan promotor tradisional seperti piperazine dan glisin sekitar dua kali biaya DEA. (Smith & Lee, 2014)

Pada penelitian ini digunakan larutan *Diethanolamine* (DEA) dengan promotor *Glycine* (GLY). Larutan DEA yang merupakan amine sekunder, digunakan karena memiliki beberapa keuntungan yaitu memiliki kecepatan reaksi dengan karbon dioksida yang lebih cepat dibanding MDEA serta lebih tidak mudah terurai dibanding MEA. Namun larutan DEA ini memiliki kekurangan yaitu membutuhkan energi yang cukup besar untuk meregenerasi, dapat terdegradasi karena oksigen dan memiliki volatilitas yang tinggi. Maka dari itu digunakan *glycine* (GLY) sebagai promotor. Penggunaan *glycine* ini karena memiliki penampakan seperti air (tidak *volatile*, viskositas dan *surface tension* yang mirip dengan air), mempunyai stabilitas tinggi terhadap oksigen sehingga tidak mudah terdegradasi oleh oksigen serta memiliki kecepatan reaksi dengan karbon dioksida yang tinggi pula dan dapat menaikkan laju reaksi DEA tanpa menghilangkan keuntungan dari penggunaan larutan DEA itu sendiri (Portugal dkk, 2008).

II.4 Kinetika Reaksi Absorpsi Karbon Dioksida

- Ketika karbon dioksida terserap dalam larutan *diethanolamine* (DEA), maka akan terjadi reaksi stokimetri sebagai berikut (Yi dkk, 2009) :



Di dalam larutan terjadi reaksi-reaksi kesetimbangan sebagai berikut :



Dimana :

$$K_c = \frac{[\text{R}_2\text{NH}]^2 [\text{CO}_2]}{[\text{R}_2\text{NCOO}^-][\text{R}_2\text{NH}_2^+]}; \quad K_{eq} = \frac{[\text{R}_2\text{NH}][\text{HCO}_3^-]}{[\text{R}_2\text{NCOO}^-]};$$

$$K_b = \frac{[\text{R}_2\text{NH}][\text{H}^+]}{[\text{R}_2\text{NH}_2^+]}; \quad K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-];$$

$$K_1 = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{[\text{CO}_2]} \text{ dan } K_2 = \frac{[\text{CO}_3^{2-}][\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]}$$

- Dari reaksi kesetimbangan diatas, dapat ditentukan nilai dari $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2]_e$ sebagai berikut (Yi dkk, 2009; Mahajani dan Dackwerts, 1982):

$$[\text{OH}^-] = \frac{K_w}{K_2} \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} \quad (2.8)$$

$$[\text{CO}_2]_e = \frac{K_c K_2}{K_{eq} K_1} \frac{[\text{HCO}_3^{2-}]^2}{[\text{CO}_3^{2-}]} \quad (2.9)$$

- Nilai K_w , K_1 dan K_2 didapat dari persamaan berikut :

$$K_w = \exp\left(39,555 - \frac{9,879 \times 10^4}{T} + \frac{5,6883 \times 10^7}{T^2} - \frac{1,465 \times 10^{10}}{T^3} + \frac{1,3615 \times 10^{12}}{T^4}\right) \quad (2.10)$$

(Yi dkk, 2009; Kent dan Elsenberg, 1976)

$$\log K_1 = -\frac{3404,7}{T} + 14,843 - 0,03279T \quad (2.11)$$

(Yi dkk, 2009; Danckwerts dan Sharma, 1966)

$$K_2 = \exp\left(-294,74 + \frac{3,6439 \times 10^5}{T} - \frac{1,8416 \times 10^8}{T^2} + \frac{4,1579 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{3,5429 \times 10^{12}}{T^4}\right) \quad (2.12)$$

(Yi dkk, 2009; Kent dan Elsenberg, 1976)

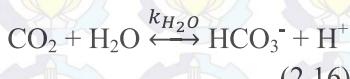
$$K_{DEA} = 10^{\left(\frac{-2274,5}{T} + 10,4493\right)} x [DEA] \quad (2.13)$$

(Blauwhoff, 1983)

$$K_b = \exp(-3071.15/T + 6.77 \ln T + (-48.76)) \quad (2.14)$$

$$K_{eq} = \exp\left(-\frac{17067.2}{T} + (-66.8 \ln T) + 439.71\right) \quad (2.15)$$

4. Langkah – langkah reaksi yang menentukan laju reaksi untuk reaksi (2.1) adalah :



5. Pada larutan yang memiliki $\text{pH} > 8$, reaksi (2.16) dapat diabaikan, dan reaksi (2.17) yang lebih dominan dan sebagai laju reaksi pembatas (*rate limiting reaction*). Sehingga persamaan laju reaksinya adalah :

$$r_{CO_2-OH^-} = k_{OH^-}[OH^-][CO_2] \quad (2.18)$$

$$\log_{10} k_{OH^-} = 13,635 - \frac{2895}{T(K)} \quad (2.19)$$

6. Persamaan laju reaksi *overall* (r_{ov}) dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$r_{ov} = k_{ov} [CO_2] \quad (2.20)$$

dimana k_{ov} adalah konstanta kecepatan reaksi *overall pseudo first order*

$$k_{ov} = k_{OH^-}[OH^-] + k_{amine}[Amine] + k_{catalyst}[Catalyst] \quad (2.21)$$

$$k_{app} = k_{catalyst} [Catalyst] \quad (2.22)$$

sehingga persamaan (2.22) menjadi :

$$k_{app} = k_{ov} - k_{OH^-}[OH^-] - k_{amine}[Amine] \quad (2.23)$$

7. Kondisi reaksi pada absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine* berpromotor campuran umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai bilangan Hatta adalah $3 < Ha < \frac{1}{2} E_i$, dimana (Lin dkk, 2009):

$$Ha = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L} \quad (2.24)$$

Untuk $Ha > 3$, laju absorpsi karbon dioksida adalah (Danckwerts, 1970; Lin dkk , 2009):

$$\bar{R} = (C_{Ai} - C_{Ae})\sqrt{D_{AL} k_{ov}} \quad (2.25)$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{C_{B0}}{z C_{Ai}} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad (2.26)$$

II.5 Absorpsi Karbon Dioksida dalam *Wetted Wall Column*

Wetted wall column merupakan kolom yang terdiri dari tabung silinder tegak dimana cairan dimasukkan dari bagian atas

dan mengalir sepanjang dinding tabung berupa lapisan tipis (*film*) kemudian keluar pada bagian bawah tabung, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.1. Udara dialirkan dari bagian bawah dan keluar dari bagian atas silinder. Ketika *film* telah mencapai kecepatan akhir distribusinya kecepatan v pada ketinggian x di bawah permukaan adalah (Altway, 2009).

$$U(x) = \frac{3}{2} \left(\frac{v}{\pi d} \right)^{2/3} \left(\frac{gp}{3\mu} \right)^{1/3} \left(1 - x^2 \left[\frac{\pi g dp}{3\mu v} \right]^{2/3} \right) \quad (2.27)$$

Dimana: U = kecepatan film cairan, v = laju alir volumetrik cairan, d = diameter pipa yang dialiri cairan, g = percepatan gravitasi, ρ = densitas cairan, μ = viskositas cairan

Kecepatan U adalah 0 pada permukaan dinding pipa, dimana $x = \delta$ (δ = tebal *film*), maka

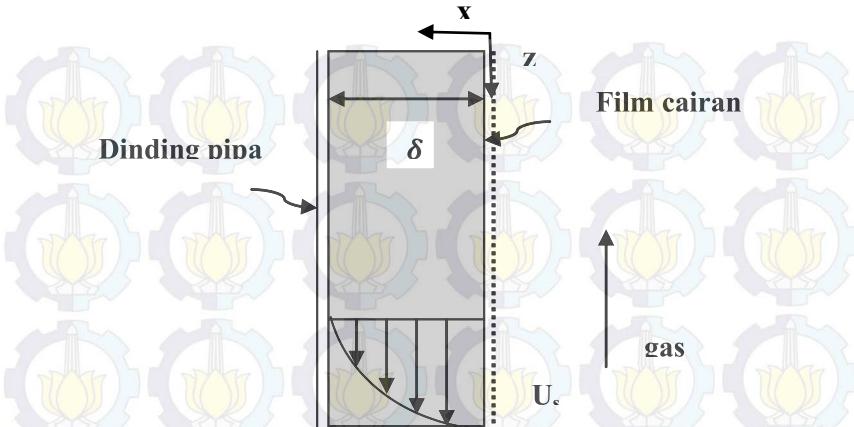
$$\delta = \left[\frac{3\mu v}{\pi g d \rho} \right]^{1/3} \quad (2.28)$$

Sehingga persamaan (2.33) dapat dituliskan:

$$U = U_s (1 - x^2 / \delta^2) \quad (2.29)$$

Kecepatan U_s pada permukaan ($x = 0$) adalah

$$U_s = \frac{3}{2} \left(\frac{v}{\pi d} \right)^{2/3} \left(\frac{gp}{3\mu} \right)^{1/3} \quad (2.30)$$



Gambar 2.1 Distribusi kecepatan *Wetted Wall Column*

Dan jika tinggi kolom adalah h dan reaksi dianggap di daerah dekat permukaan, maka waktu kontak gas terhadap permukaan *film* adalah :

$$t = \frac{h}{U_s} = \frac{2h}{3} \left[\frac{3\mu}{gp} \right]^{1/3} \left[\frac{\pi d}{v} \right]^{2/3} \quad (2.31)$$

Bila $Q_{(t)}$ adalah jumlah gas yang terserap per satuan luas permukaan selama waktu kontak (t), maka laju absorpsi rata-rata selama waktu t adalah $Q_{(t)}/t$. *Film* dianggap sangat tipis, maka area total permukaan yang terbuka sama dengan permukaan pipa sebesar πdh , laju total absorpsi (q) ke dalam *film* menjadi :

$$\frac{Q_{(t)}}{t} = \frac{q}{\pi dh} \quad (2.32)$$

Laju absorpsi (q) dapat dihitung secara eksperimen, dan $Q_{(t)}$ dihitung dari persamaan (2.32), t dihitung dari persamaan (2.31) dan dapat diubah – ubah dengan merubah laju alir (v) atau tinggi

kolom (h). Jadi $Q(t)$ dapat ditentukan sebagai fungsi waktu (t) (Altway, 2009).

II.6 Regim Reaksi

Di dalam *film* atau lapisan batas cairan terjadi kompetisi antara reaksi dan difusi. Berdasarkan kecepatan relatif antara reaksi dan difusi, maka dapat diklasifikasikan beberapa regim-regim reaksi yaitu :

- reaksi sangat lambat
- reaksi lambat
- reaksi cepat, reaksi sangat cepat dan reaksi spontan

Klasifikasi regim-regim reaksi ini digunakan bilangan hatta yang pada dasarnya merupakan perbandingan antara laju reaksi terhadap laju difusi. Jadi harga bilangan hatta yang besar menunjukkan reaksi yang cepat, sangat cepat atau spontan. Harga bilangan hatta yang kecil menunjukkan reaksi yang lambat atau sangat lambat.

1. Regim reaksi sangat lambat

Dalam hal ini reaksi sangat lambat dibandingkan kecepatan difusi. Regim ini dipenuhi bila $Ha < 0,02$. Bila target proses adalah untuk absorpsi gas, maka dapat dianggap bahwa tak terjadi reaksi di dalam *film* maupun di dalam badan *liquid*. Reaksi sama sekali tak mempengaruhi laju absorpsi. Jadi laju absorpsi gas dengan reaksi sangat lambat sama dengan laju absorpsi fisik (tanpa reaksi). Bila target proses adalah untuk terjadinya reaksi maka proses ini dikendalikan dengan reaksi kimia, dan laju proses sama dengan laju reaksi.

2. Regim reaksi lambat

Pada regim ini, tak terjadi reaksi di dalam *film*, berarti *enhancement factor* sama dengan satu. Tapi ada reaksi di dalam badan cairan. Sehingga laju absorpsi masih dipercepat

dengan adanya reaksi ini karena konsentrasi gas terlarut di dalam badan cairan menurun dengan adanya reaksi sehingga konsentrasi *driving force* meningkat dan laju absorpsi juga meningkat. Regim ini dipenuhi bila $0,02 < Ha < 0,5$.

3. Regim reaksi cepat

Pada regim ini terjadi reaksi di dalam *film* tapi tak terjadi reaksi di dalam badan cairan. Regim ini dipenuhi bila $Ha > 2$. Untuk reaksi *irreversible*, konsentrasi gas terlarut di dalam badan cairan bisa dianggap nol.

(Danckwerts, 1970; Altway, 2009)

II.7 Kelarutan Gas dalam Cairan

Pada proses perpindahan massa gas – cair, dianggap terjadi kesetimbangan uap – cair untuk gas yang diserap pada bidang batas gas – cair. Dalam hal ini, konsentrasi suatu gas pada bidang batas ini sama dengan kelarutannya pada tekanan yang ada pada permukaan cairan. Kelarutan gas dalam cairan dapat ditentukan menggunakan Hukum Henry, seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$P_A = He C_{Ai} \quad (2.33)$$

dengan He adalah konstanta Henry yang nilainya dapat diperoleh dari literatur, dan P_A adalah tekanan parsial gas A dalam fasa gas. Harga He yang ada di literatur adalah untuk sistem gas-cair. Untuk gas yang terlarut dalam suatu larutan elektrolit, harga konstanta Henry di dapat dari persamaan :

$$\log(He/He^0) = h I \quad (2.34)$$

dimana He^0 adalah konstanta Henry untuk sistem gas-cair dan I adalah kekuatan ionik dari larutan yang diperoleh dari :

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2 \quad (2.35)$$

C_i adalah konsentrasi ion – ion yang valensinya Z_i. Besaran h di dapat dari :

$$h = h_+ + h_- + h_G \quad (2.36)$$

Di dalam campuran elektrolit, harga He dapat diperoleh dari:

$$\log(He/He^0) = h_1 I_1 + h_2 I_2 \quad (2.37)$$

dimana I₁ adalah kekutan ionik untuk larutan 1 dan h₁ adalah harga h untuk larutan elektrolit 1 (Danckwerts,1970). Karena amine merupakan pelarut organik yang tidak terionisasi, maka digunakan persamaan:

$$H_{e,T}^0 = H_{e,298}^0 \exp\left(\frac{-d \ln k_H}{d(1/T)} x \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right) \quad (2.38)$$

(Wiguna dan Naszaruddin, 2014)

II.8 Penelitian Terdahulu

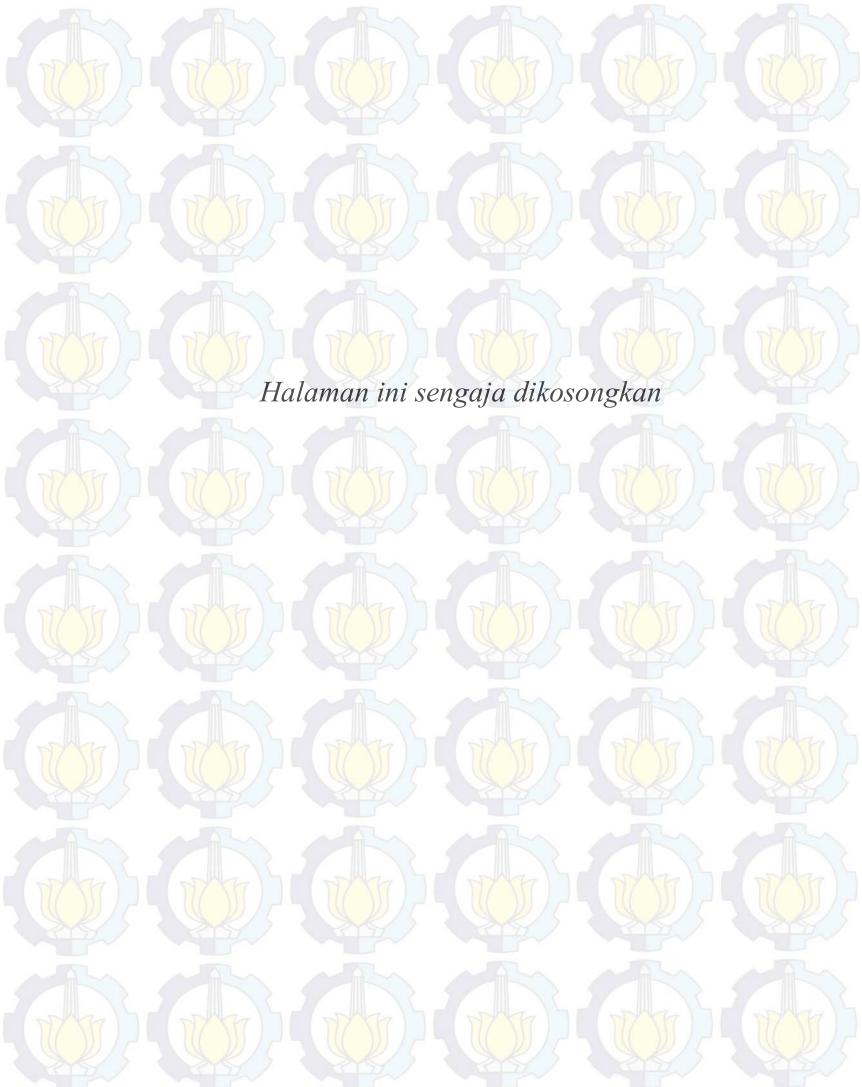
Beberapa penelitian terdahulu yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk referensi, seperti yang telah tercantum dalam Tabel 2.2 berikut :

Tabel 2.2 Penelitian terdahulu

No	Tahun	Nama Peneliti	Uraian
1	1983	Blauwhoff	Mempelajari reaksi antara CO ₂ dan alkanolamine dalam aqueous solution yang mendapati bahwa DEA dan diisopropylamine (DIPA) sangat cocok diterapkan dengan penurunan rumus kecepatan reaksi dari <i>the proposed mechanism</i>
2	1986	Yih dan Sun	Mempelajari absorpsi hidrogen sulfida dan karbon dioksida dalam larutan kalium karbonat dengan atau tanpa promotor amine (DEA dan DIPA) pada suhu 22-80°C menggunakan peralatan wetted wall column.
3	1988	Versteeg dan Oyevaar	Mempelajari reaksi absorpsi karbon dioksida dan DEA pada suhu 298 K.
4	1991	Glasscock dan Critchfield	Mempelajari tentang absorpsi/desorpsi karbon dioksida pada campuran larutan MDEA dengan MEA atau DEA.
5	1999	Bavbek dan Alper	Didapat mekanisme reaksi dan kinetika reaksi karbon dioksida pada alkanolamine primer dan sekunder.
6	2004	Cullinane dan Rochelle	Melakukan penambahan 0,6 M promotor piperazine dalam 20-30% berat larutan kalium karbonat pada suhu 40-80°C menggunakan peralatan <i>wetted wall column</i> .

Lanjutan Tabel 2.2 Penelitian terdahulu

No	Tahun	Nama Peneliti	Uraian
7	2005	Brouwer	Mempelajari amino-acid Salt untuk menangkap CO ₂ dari flue gas dimana larutan amino acid salt dapat secara baik digunakan untuk menangkap CO ₂ karena memiliki resitensi yang baik terhadap oksigen dan kinetika reaksi yang cepat.
8	2009	Portugal dkk	Melakukan model simulasi kelarutan karbon dioksida pada larutan garam asam amino menggunakan <i>stirred reactor</i> .
9	2009	Delgado dkk	Simulasi absorpsi karbon dioksida dalam larutan DEA dengan menggunakan membran <i>hollow fiber</i> sebagai kontaktor
10	2011	Siemieniec dkk	Mempelajari kinetika reaksi karbon dioksida dalam larutan diethanolamine pada temperatur 293-313 K dengan menggunakan teknik <i>stopped-flow</i> .
11	2014	Illuta dkk	Mempelajari kinetika absorpsi karbon dioksida dalam diethanolamine dengan <i>stirred cell reactor</i>
12	2014	Devries	Mempelajari absorpsi karbon dioksida dalam larutan karbonat berpromotor pada suhu yang tinggi. Promotor yang berbasis asam amino menghasilkan laju reaksi yang lebih tinggi daripada MEA.
13	2014	Wiguna dan Naszaruddin	Mempelajari model simulasi absorpsi gas karbon dioksida dalam larutan MDEA berpromotor PZ.
14	2014	Borhani	Mempelajari simulasi dan membandingkan bermacam promotor untuk absorpsi karbon dioksida dengan larutan DEA.



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Deskripsi Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menentukan data kinetika reaksi absorpsi gas karbon dioksida dalam larutan *Diethanolamine* (DEA) berpromotor *glycine* menggunakan peralatan *wetted wall column* skala laboratorium pada tekanan atmosfer dan suhu 303.15 K (30°C) – 328.15 K (55°C).

III.2 Bahan dan Peralatan Penelitian

III.2.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah :

1. Campuran gas karbon dioksida dan nitrogen (dengan komposisi CO₂ 20% dan N₂ 80%)
2. *Diethanolamine* (DEA)
3. *Glycine*
4. Asam oksalat (C₂H₂O₄)
5. Natrium hidroksida (NaOH)
6. Asam klorida (HCl)
7. Aquadest
8. Indikator phenolphthalein
9. Indikator metil orange

III.2.2 Peralatan Penelitian

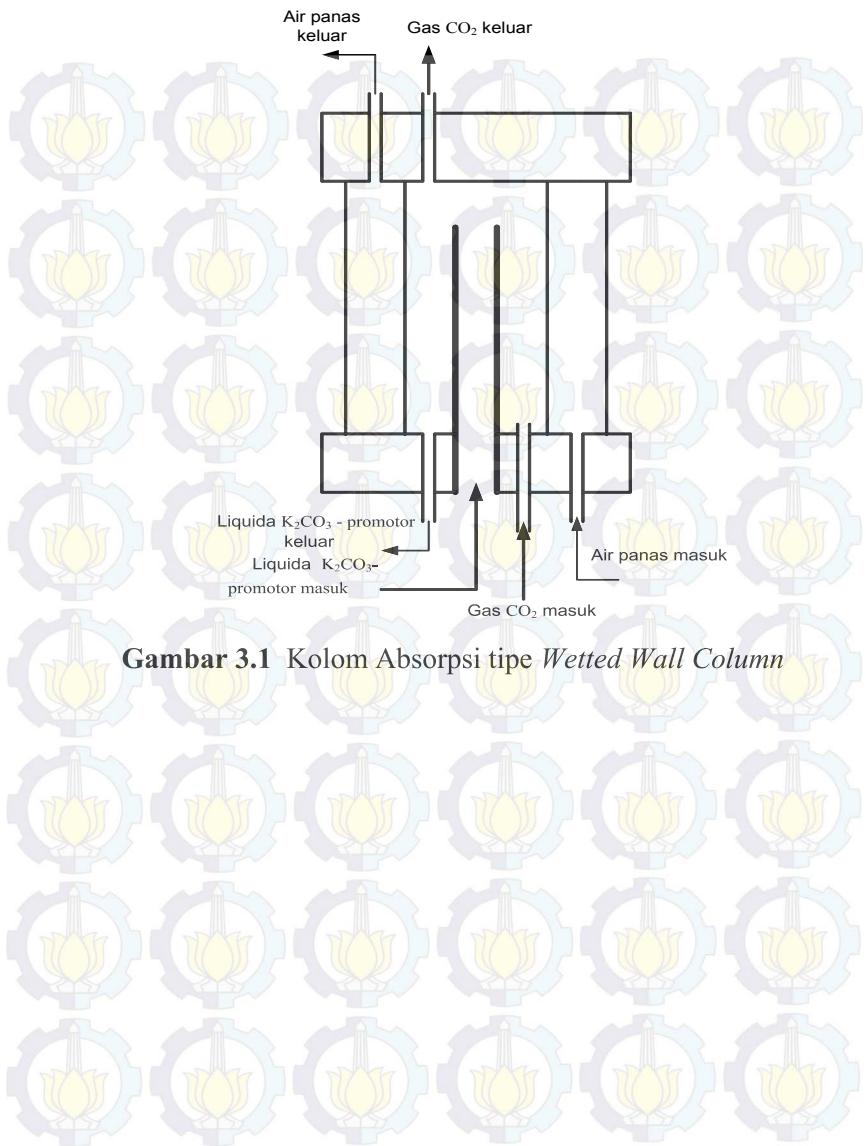
Peralatan yang digunakan pada penelitian adalah :

1. Peralatan *wetted wall column* :

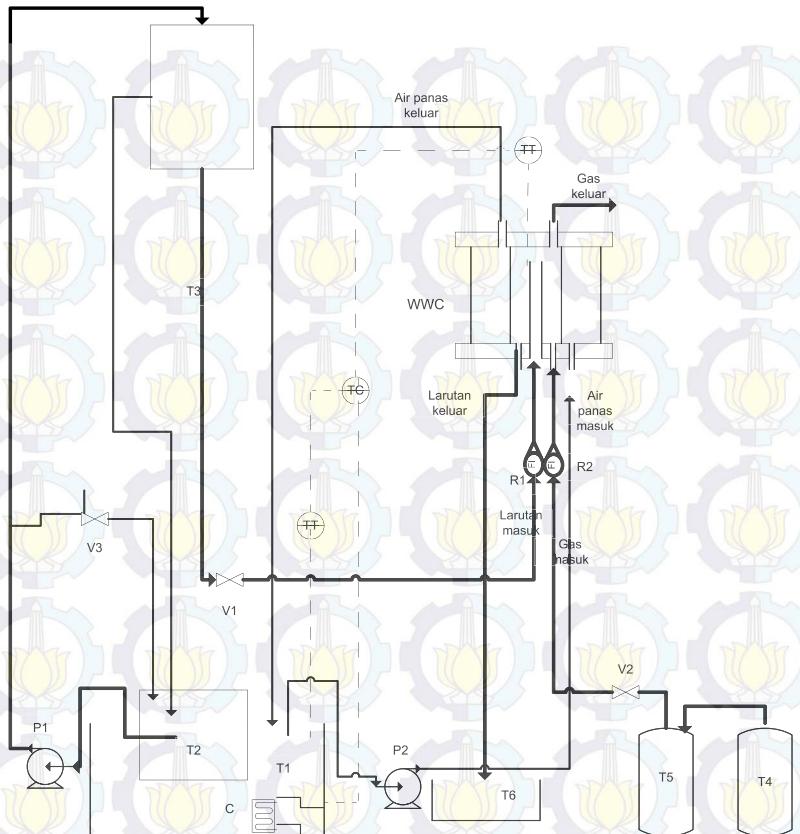
Peralatan utama yang digunakan adalah kolom absorpsi tipe *Wetted Wall Column* (WWC), seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Desain kolom WWC ini mengacu pada beberapa peneliti

sebelumnya, seperti Rochelle, (2009); Pacheco (2000); Bishnoi dan Rochelle (2000); Dang (2001); Cullinane dan Rochelle (2004); Thee, dkk (2012) yang bergerak di bidang perpindahan massa, termodinamika, dan kinetika reaksi pada proses absorpsi gas karbon dioksida dengan pelarut kalium karbonat dan atau dengan alkanolamine.

Wetted Wall Column tersusun atas dua silinder koaksial dari bahan kaca, dengan diameter dalam kaca bagian luar 8 cm dan diameter luar kaca bagian dalam 4 cm. Di bagian tengah terdapat *tube* dari bahan *stainless steel* dengan panjang 9.3 cm, diameter luar 1.3 cm dan luas permukaan kontak 37.96 cm^2 . *Tube* berfungsi sebagai saluran aliran larutan *diethanolamine* (DEA)-*glycine*. Larutan *diethanolamine* mengalir di bagian dalam *tube* kemudian *overflow* pada bagian ujung atas *tube* dan bergerak mengalir ke bawah membentuk lapisan tipis di seluruh permukaan *tube*, sedangkan aliran gas karbon dioksida mengalir dari bawah ke atas dan terjadi kontak dengan lapisan tipis larutan *diethanolamine* di seluruh permukaan luar *tube* tersebut. Sisi anulus antara kedua silinder kaca tersebut berfungsi untuk aliran pemanas dari *Water Bath Thermostat* sebagai media pengatur kestabilan temperatur sistem WWC.



Gambar 3.1 Kolom Absorpsi tipe *Wetted Wall Column*



Gambar 3.2. Skema Peralatan *Wetted Wall Column*

Keterangan gambar :

C : Koil pemanas

P1 : Pompa larutan DEA berpromotor

P2 : Pompa air

R1 : Rotameter cairan

R2 : Rotameter gas

T1	: <i>Waterbath</i>
T2	: Tangki reservoir (tangki penampung larutan DEA berpromotor)
T3	: Tangki <i>overflow</i>
T4	: Tangki gas umpan (CO_2)
T5	: Tabung saturator
T6	: Tangki sampel
TT	: <i>Thermo transmitter</i>
TC	: <i>Thermo control</i>
V1	: <i>Gate valve</i> larutan
V2	: <i>Gate valve</i> CO_2
V3	: <i>Gate valve (by pass)</i>
WWC	: <i>Wetted wall column</i>

III.3 Kondisi Operasi dan Variabel Penelitian

Kondisi operasi dan variabel penelitian yang digunakan pada penelitian adalah :

- Kondisi operasi :
 - 1. Tekanan : 1 atmosfer
 - 2. Suhu : 30, 35, 40, 45, 50, 55°C
- Gas umpan
 - 1. Jenis Gas umpan : campuran 20% $\text{CO}_2 + 80\% \text{ N}_2$
 - 2. Laju alir gas : 6 L/menit
- Pelarut
 - 1. Jenis pelarut : DEA
 - 2. Konsentrasi pelarut : 30% berat
 - 3. Laju alir pelarut : 200 mL/menit
- Promotor
 - 1. Jenis promotor : *glycine*

2. Konsentrasi promotor : 1-3% (% berat)
Glycine

III.4 Prosedur Penelitian

1. Tahap persiapan bahan dan peralatan penelitian

- a. Mempersiapkan bahan penelitian, seperti campuran gas karbon dioksida dan nitrogen, *diethanolamine*, *glycine*, aquadest, indikator PP, indikator MO, asam klorida, asam oksalat, natrium hidroksida.
- b. Mempersiapkan peralatan penelitian, seperti bak penampung larutan *diethanolamine*, bak penampung sampel, buret, statif, erlenmeyer, labu ukur, gelas ukur, corong kaca, pipet volume, pipet tetes.
- c. Merangkai peralatan *wetted wall column* seperti gambar 3.2
- d. Mempersiapkan peralatan titrasi yang digunakan untuk analisa larutan.

2. Tahap pelaksanaan penelitian

- a. Mengisi air ke dalam *waterbath* (T1) sebagai pengatur temperatur dalam jaket WWC
- b. Membuat larutan *diethanolamine* 30% berat
- c. Menambahkan masing-masing *glycine* (% berat) sesuai dengan variabel ke dalam larutan DEA 30% berat, dan untuk DEA murni tidak ditambahkan promotor *glycine*
- d. Memasukkan larutan DEA berpromotor ke dalam tangki *reservoir* (T2)
- e. Mengeset suhu operasi sesuai dengan variabel
- f. Mensirkulasikan air panas pada sisi anulus kolom WWC dan kembali ke *waterbath* (T1)

- g. Mensirkulasikan larutan DEA berpromotor menggunakan pompa dari tangki *reservoir* (T2) ke tangki *overflow* (T3) hingga larutan *overflow*.
- h. Mengatur laju alir larutan DEA berpromotor, sehingga larutan mengalir dari bawah ke atas melalui bagian dalam *tube* hingga terbentuk lapisan tipis pada permukaan *tube*
- i. Pada saat suhu sistem telah mencapai yang diinginkan dan aliran telah stabil, campuran gas karbon dioksida dan nitrogen dialirkan melewati tangki saturator (T5).
- j. Kemudian campuran gas karbon dioksida dan nitrogen mengalir dari bawah kolom menuju atas kolom bagian luar pipa *stainless steel* sehingga terjadi kontak antara gas karbon dioksida dan nitrogen dengan lapisan tipis cairan di seluruh permukaan luar *tube* hingga kondisi *steady state*.
- k. Apabila tercapai kondisi *steady state*, mengambil sampel larutan DEA berpromotor pada tangki penampung sampel (T6) untuk dilakukan analisa kandungan karbonat dan bikarbonat menggunakan metode titrasi menggunakan indikator *phenolphthalein* dan *metil orange*.

3. Tahap Analisa Sampel

Analisa kandungan karbonat dan bikarbonat

Analisa konsentrasi awal dan akhir kandungan karbonat dan bikarbonat dilakukan dengan metode titrasi menggunakan indikator *phenolphthalein* dan *metil orange*.

III.5 Evaluasi Data

Berdasarkan data hasil eksperimen dan beberapa literatur dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan konstanta kecepatan reaksi berpromotor dengan tahapan sebagai berikut:

- Perhitungan waktu kontak gas-cairan (Danckwerts, 1970):

$$t = \frac{h}{U_s} = \frac{2h}{3} \left[\frac{3\mu}{g\rho} \right]^{1/3} \left[\frac{\pi d}{v} \right]^{2/3} \quad (3.1)$$

- Perhitungan jumlah gas yang diserap per satuan luas permukaan selama waktu kontak (t), maka laju rata-rata absorpsi selama t adalah $Q(t)/t$ adalah (Danckwerts, 1970)

:

$$\frac{Q(t)}{t} = \frac{q}{\pi dh} \text{ dimana:}$$

$$q = v \times ([karbonat + bikarbonat]) \quad (3.2)$$

- Perhitungan $[OH^-]$ dan $[CO_2]_e$ dari reaksi kesetimbangan menggunakan persamaan (Yi dkk, 2009):

$$[OH^-] = \frac{K_w}{K_2} \frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} \quad (3.3)$$

$$[CO_2]_e = \frac{K_c K_2}{K_{eq} K_1} \frac{[HCO_3^-]^2}{[CO_3^{2-}]} \quad (3.4)$$

- Nilai K_w , K_1 dan K_2 didapat dari persamaan berikut :

$$K_w = \exp \left(39,555 - \frac{9,879 \times 10^4}{T} + \frac{5,6883 \times 10^7}{T^2} - \frac{1,465 \times 10^{10}}{T^3} + \frac{1,3615 \times 10^{12}}{T^4} \right) \quad (3.5)$$

(Yi dkk, 2009)

$$\log K_1 = - \frac{3404,7}{T} + 14,843 - 0,03279T \quad (3.6)$$

(Yi dkk, 2009)

$$K_2 = \exp \left(-294,74 + \frac{3,6439 \times 10^5}{T} - \frac{1,8416 \times 10^8}{T^2} + \frac{4,1579 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{3,5429 \times 10^{12}}{T^4} \right) \quad (3.7)$$

(Yi dkk, 2009)

$$K_{DEA} = 10^{\left(\frac{-2274,5}{T} + 10,4493\right)} x [DEA] \quad (3.8)$$

(Blauwhoff, 1983)

$$K_b = \exp(-3071.15/T + 6.77 \ln T + (-48.76)) \quad (3.9)$$

$$K_{eq} = \exp \left(-\frac{17067.2}{T} + (-66.8 \ln T) + 439.71 \right) \quad (3.10)$$

- Perhitungan nilai C_{Ai} didapatkan dengan cara trial k_{ov} , menggunakan persamaan (Altway, 2009) :

$$C_{Ai} = \frac{k_g P_A + C_{Ae} \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \quad (3.11)$$

- Setelah didapatkan nilai C_{Ai} dari persamaan (3.11), maka nilai k_{ov} dapat ditentukan dari persamaan (Danckwerts, 1970):

$$\frac{Q}{t} = \bar{R} = (C_{Ai} - C_{Ae}) \sqrt{D_{AL} x k_{ov}} \quad (3.12)$$

- Menentukan nilai k_{app} dari persamaan dibawah ini :

$$k_{app} = k_{ov} - k_{OH^-} [\text{OH}^-] - k_{DEA} [DEA] \quad (3.13)$$

dimana :

$$k_{app \text{ glycine}} = k_{glycine} [\text{glycine}] \quad (3.14)$$

- Harga k_{OH^-} diperoleh dari persamaan berikut (Lin dkk, 2009) :

$$\log_{10} k_{OH^-} = 13,635 - \frac{2895}{T} \quad (3.15)$$

- Konstanta laju reaksi *glycine* (k_{glycine}) merupakan fungsi temperatur yang dinyatakan dengan persamaan Arhenius:

$$k_{\text{glycine}} = A_{\text{glycine}} e^{-\frac{E}{RT}} \quad (3.16)$$

Keterangan :

1. Kondisi reaksi pada absorpsi karbon dioksida dalam larutan DEA berpromotor umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai $3 < Ha < \frac{1}{2} E_i$, dimana (Danckwerts, 1970; Lin dkk, 2009) :

$$Ha = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L} \quad (3.17)$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{C_{B0}}{z C_{Ai}} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad (3.18)$$

2. Nilai koefisien perpindahan massa sisi gas (k_g) diperoleh dari persamaan (Cullinane dan Rochelle, 2004)

$$k_g = \frac{Sh D_{AG}}{R T d} \quad (3.19)$$

Dimana,

$$Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{AG}} \quad (3.20)$$

$$Re = \frac{\rho_g v d}{\mu_g} \quad (3.21)$$

$$Sh = 1.075 (Re Sc \frac{d}{h})^{0.85} \quad (3.22)$$

3. Nilai koefisien perpindahan massa sisi cairan (k_L) diperoleh dari persamaan (Hatta dan Katori, 1934)

$$k_L = 0.422 \sqrt{\frac{D_{AL} \chi \Gamma}{\rho (B_F)^2}} \quad (3.23)$$

4. Nilai koefisien difusivitas dalam liquid diperoleh dari persamaan Wilke Chang (Wilke dan Chang, 1955) :

$$D_{AL/W} = 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_W)} \frac{T}{\mu_W V_A^{0.6}} \quad (3.24)$$

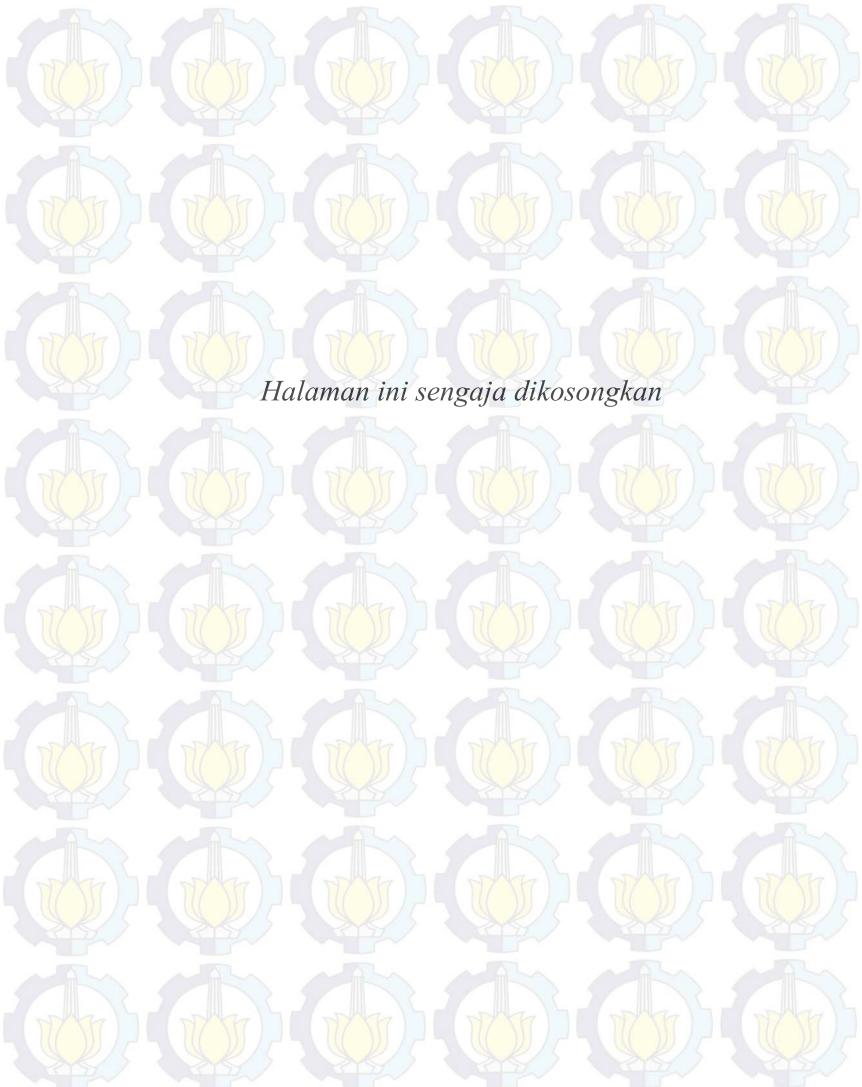
sedangkan difusivitas dalam gas diperoleh dari tabel 6.2-1 (Geankoplis 3rd edition) dan dilakukan koreksi suhu sebagai berikut :

$$\left(\frac{D_{AG,T}}{D_{AG,T_0}} \right) = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,75} \quad (3.25)$$

5. Data kelarutan di dapat dari persamaan konstanta Henry :

$$H_e^0 T = H_e^0_{298} \exp \left(\frac{-d \ln k_H}{d(1/T)} x \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) \right) \quad (3.26)$$

(Wiguna dan Nazaruddin, 2014)



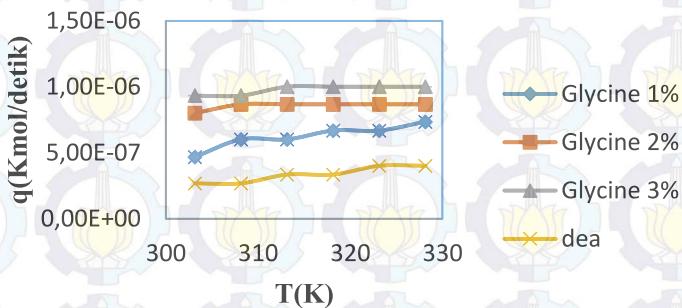
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil penelitian data kinetika reaksi absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine* (DEA) berpromotor *glycine* menggunakan peralatan *Wetted Wall Column (WWC)* dengan suhu 303.15 K hingga 328.15 K pada tekanan 1 atmosfer. Campuran gas yang digunakan terdiri dari 20% karbon dioksida dan 80% nitrogen. Sistem larutan terdiri dari sistem larutan 30% berat DEA dengan variasi penambahan konsentrasi promotor *glycine* (1-3% berat) dan juga dengan DEA murni.

IV.1 Pengaruh Kenaikan Suhu Terhadap Laju Absorpsi Karbon Dioksida

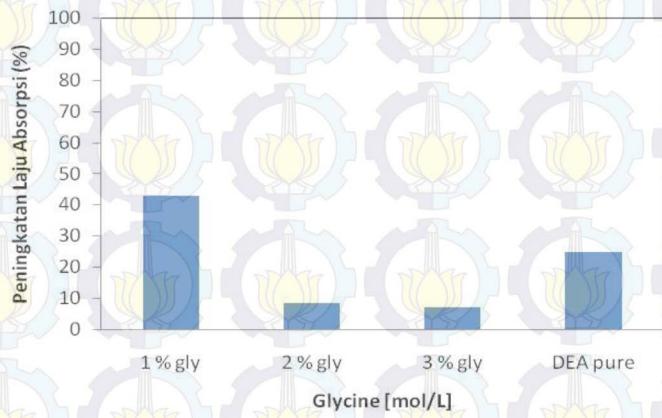


Gambar 4.1 Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine* (DEA) murni dan *diethanolamine* (DEA) berpromotor *glycine* pada suhu 303.15 K – 328.15 K

Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absorpsi karbon dioksida ditunjukkan pada **Gambar 4.1**, dimana laju absorpsi

karbon dioksida cenderung meningkat seiring dengan peningkatan suhu pada konsentrasi *glycine* 1% berat. Peningkatan laju absorpsi ini disebabkan karena semakin meningkatnya suhu, maka energi kinetik molekul-molekul zat yang bereaksi akan bertambah sehingga reaksi yang terjadi akan semakin cepat serta dengan kenaikan suhu difusifitas menjadi meningkat (Lin, 2009). Sedangkan pada konsentrasi *glycine* 2% berat dan 3% berat cenderung stabil pada suhu 313,15 K ke atas. Hal ini dikarenakan reaksi absorpsi berlangsung terlalu cepat sehingga pengaruh kinetika reaksi tidak terlalu signifikan dan yang terjadi hanya perpindahan massanya secara difusi. Sehingga didapat rata-rata peningkatan laju absorpsi dari suhu pada DEA berpromotor *glycine* 1-3% dari suhu 303.15 K menjadi 328.15 K sekitar 24,2%.

IV.2 Pengaruh Konsentrasi Promotor Terhadap Laju Absorpsi Karbon Dioksida

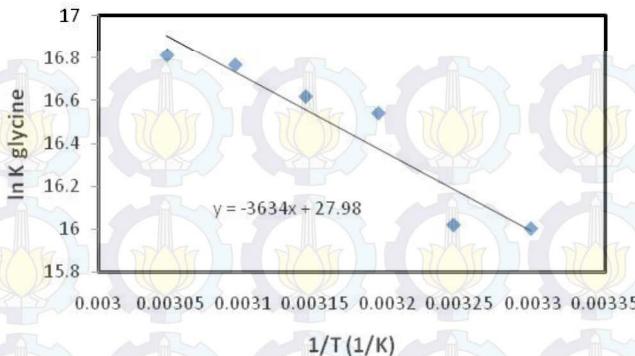


Gambar 4.2 Peningkatan laju absorpsi tiap konsentrasi promotor pada suhu 303.15 K – 328.15 K

Pada **Gambar 4.2** menunjukkan pengaruh konsentrasi promotor terhadap laju absorpsi karbon dioksida, dimana semakin besar konsentrasi promotor yang diberikan, maka semakin stabil pula laju absorpsi karbon dioksida. Peningkatan laju absorpsi untuk konsentrasi glycine 1-3% dan DEA murni masing-masing sebesar 42,86%; 8,33%; 7,14%; dan 25%. Dapat dilihat peningkatan laju absorpsi tertinggi terdapat pada glycine 1%, ini dikarenakan dengan penambahan glycine sebesar 1% masih belum cukup untuk membuat pelarut stabil seperti pada konsentrasi glycine 2 dan 3%. Sedangkan, dari **Gambar 4.1** dapat pula kita lihat bahwa terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara pelarut DEA murni dengan pelarut yang menggunakan promotor glycine, laju absorpsi antara DEA murni dengan DEA berpromotor 1% memiliki kenaikan sebesar 46,4%.

Kenaikan ini dikarenakan penambahan sejumlah promotor yang berperan sebagai katalisator akan menurunkan energi aktivasi. Dengan menurunnya energi aktivasi, maka pada suhu yang sama reaksi dapat berjalan lebih cepat dan kinetika reaksi meningkat (Thee, 2012), sehingga laju absorpsi karbon dioksida juga mengalami kenaikan. Dan ini menunjukkan bahwa promotor *glycine* sangat efektif untuk meningkatkan laju absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine*.

IV.3 Kereaktifan Promotor *Glycine* pada Absorpsi Karbon Dioksida



Gambar 4.3 Hubungan $\ln k$ vs $1/T$ pada laju absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine* berpromotor *glycine* pada suhu $303.15\text{ K} - 328.15\text{ K}$

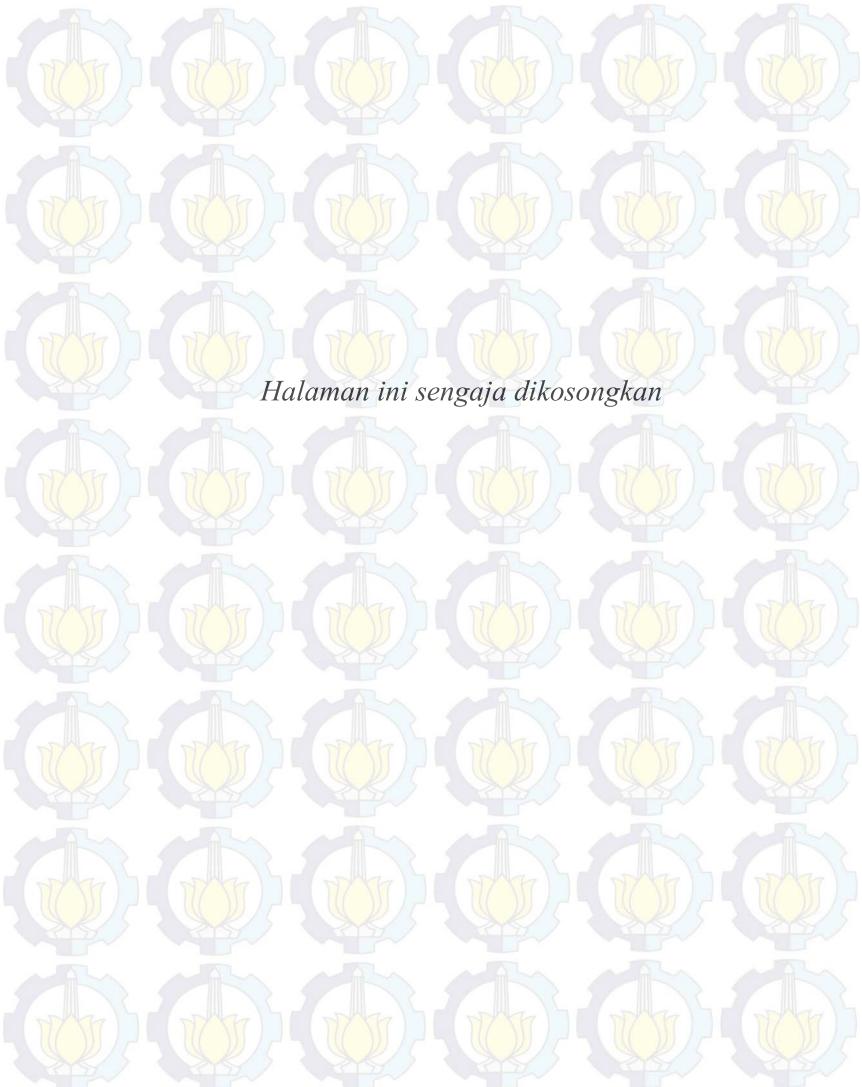
Kereaktifan *glycine* sebagai promotor dalam absorpsi karbon dioksida dapat ditentukan dari konstanta kecepatan reaksi yang dihitung dengan persamaan *Arhenius*. Pada **Gambar 4.3**, didapatkan intersept untuk *glycine* yaitu anti- $\ln A = 1.419 \times 10^{12}$ dan slope $(-E/R) = -3634$, sehingga diperoleh persamaan $k_{\text{glycine}} = 1.419 \times 10^{12} \exp(-3634/T)$. Dari hasil percobaan ini, nilai k_{ov} antara pelarut DEA murni dengan DEA berpromotor *glycine* lebih besar nilai k_{ov} berpromotor *glycine*, dapat dilihat pada **Tabel B.12** hingga **Tabel B.15**. Hal ini dikarenakan *glycine* termasuk golongan senyawa amine primer yang menurut literatur mempunyai kemampuan lebih baik dalam absorpsi karbon dioksida dibandingkan dengan DEA yang merupakan senyawa amine sekunder (Ullmann, 2005). Serta *glycine* mempunyai ketahanan terhadap panas yang baik, sehingga tidak mudah terdegradasi (Moh. Songolzadeh, 2012).

Berikut merupakan tabel perbandingan berbagai macam pelarut yang biasa digunakan dalam proses absorpsi karbon dioksida menggunakan *wetted-wall column*:

Tabel 4.1 Perbandingan Persamaan Konstanta Reaksi Absorpsi Karbon Dioksida Berbagai Macam Pelarut

Pelarut	Nilai k (L/mol.s)	Referensi
Glycine	$1,419 \times 10^{12} \exp\left(\frac{-36347}{T}\right)$	Studi ini
MEA	$9,56 \times 10^8 \exp\left(\frac{-3802,4}{T}\right)$	Aboudheir, 2006
MDEA	$2,58 \times 10^8 \exp\left(\frac{-3736,5}{T}\right)$	Aboudheir, 2006
[OH ⁻]	$2,53 \times 10^{11} \exp\left(\frac{-4311}{T}\right)$	Thee, 2012

Pada suhu 303,15 K didapat masing-masing k_{app} dari berbagai pelarut yaitu 8.829×10^6 L/mol.s untuk glycine, 2.612×10^3 L/mol.s untuk MEA, 1.145×10^3 L/mol.s untuk MDEA, dan 1.687×10^5 L/mol.s untuk K₂CO₃. Berdasarkan data tersebut dapat dilihat bahwa nilai k_{app} glycine lebih besar dibandingkan pelarut lainnya dan hal ini menunjukkan glycine lebih baik dalam proses absorpsi karbon dioksida.



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadi. M, Gomes. V.G, Advanced Modelling in Performance Optimization for Reactive Separation in Industrial CO₂ Removal, *Separation and Purification Technology* 63 (2008) 107-115.
- Altway. A, Perpindahan Massa disertai reaksi kimia, Bee Marketer Institute, Jakarta, 2008.
- Aronu. E.U, Svenden. F.S, Investigation of Amine Amino Acid Salt for Carbon Dioxide Absorbtion, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4 (2010) 771-775.
- Astarita. G, Carbon Dioxide Absorption in Aqueous Monoethanolamine Solutions, *Chemical Engineering Science* 16 (1960) 202-207.
- Astarita. G, Savage. D.W, Promotion of CO₂ Mass Transfer in Carbonate Solutions, *Chemical Engineering Science* 36 (1980) 581-588.
- Augugliaro. V, dan Rizzuti. L, Kinetics of carbon dioxide absorption into catalysed potassium carbonate solutions, *Chem.Eng. Sci.* 42 (1987) 2339-2343.
- Bosch. H, Versteeg. G.F, Gas-Liquid Mass Transfer with Parallel Reversible Reactions I. Absorption of CO₂ into Solution of Sterically Hindered Amines, *Chemical Engineering Science* 44 (11) (1989) 2723-2734.
- Bishnoi. P.S, dan Rochelle. G.T, "Absorption of carbon dioxide into aqueous piperazine: Reaction kinetics, mass transfer and solubility", *Chem. Eng. Sci.* 55 (22) (2000) 5531-5543.
- Bishnoi. P.S, Carbon dioxide absorption and solution equilibrium in piperazine activated methyldiethanolamine, Ph.D Dissertation, The University of Texas at Austin (2000).
- Blauwhoff. P.M.M, Versteeg. G.F, A Study on The Reaction between CO₂ And Alkanolamines in Aqueous Solutions, *Chemical Engineering Science* 38 (9) (1983) 1411-1429.

- Brouwer. J.P, Feron. P.H.M, Asbroek ten, N.A.M, "Amino-acid salt for CO₂ Capture from Flue Gas", TNO Science & Industry, Department of Separation Technology (2005).
- Cullinane. J.T, dan Rochelle. G.T, Carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by piperazine, Chem.Eng. Sci. 59 (2004) 3619-3630.
- Cullinane. J.T, Thermodynamics and kinetics of aqueous piperazine with potassium carbonate for carbon dioxide absorption, Dissertation, University of Texas, Austin (2005).
- Dang. Hongyi, Rochelle. G.T, CO₂ Absorption Rate and Solubility in Monoethanolamine/Piperazine/Water, The University of Texas at Austin (2001).
- Danckwerts. P.V, Gas-Liquid Reactions, McGraw-Hill, New York, 1970.
- Gorak, Andrzej, European Roadmap of Process Intensification: Reactive Absorption, Creative Energie (2005).
- Gosh. U.K, Kentish. S.E, Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Potassium Carbonate Promoted by Boric Acid, Energy Procedia 1 (2009) 1075-1081
- Herzog, Howard., Golomb, Dan, Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel Use, Massachusetts Institute of Technologi, Laboratory for Energy and the Environment (2004).
- Khodayari, Arezoo, Experimental and Theoretical Study of Carbon Dioxide Absorption into Potassium Carbonate Solution Promoted with Enzyme, University of Illinois (2010).
- Knuutila, Hanna, Juliussen, Olav, Density and N₂O Solubility of Sodium and Potassium Carbonate Solutions in The Temperature Range 25 to 80°C, Chemical Engineering Science (2010) 2177-2182
- Kumar. S.Dash, Samanta. A, Absorption of Cabon Dioxide in Piperazine Activated Concentrated Aqueous 2-amino-2-

- methyl-1-propanol Solvent, Chemical Engineering Science 66 (2011) 3223-3233
- Lin. S.H, dan Shyu. C.T, Performance characteristics and modeling of carbon dioxide absorption by amines in a packed column, Waste Management 19 (1999) 255-262.
- Pacheco. M.A, Kaganoi. S, Rochelle. G.T, CO₂ Absorption into Aqueous Mixtures of Diglycolamine and Methyldiethanolamine, Chemical Engineering Science 55 (2000) 5125-5140
- Polasek. J, dan Bullin. J.A, Selecting amines for sweetening units, Tulsa, OK: Gas Processors Association (1994).
- Rahimpour. M.R, Kashkooli. A.Z, Enhanced Carbon Dioxide Removal by Promoted Hot Potassium Carbonate in a Split-Flow Absorber, Chemical Engineering and Processing 43 (2004) 857-865.
- Rao. A.B, Rubin. E.S, A Technical, Economic and Environmental Assessment of Amine-based CO₂ Capture Technology for Power Plant Greenhouse Gas Control, National Energy Technology Laboratory, West Virginia, (2002).
- Rochelle. G.T, Dugas. R.E, Carbon Dioxide Absorption, Desorption, and Diffusion in Aqueous Piperazine and Monoethanolamine, The University of Texas at Austin, (2009).
- Seo. J.B, Jeon. S.B, Kim. J.Y, Vaporization Reduction Characteristic of Aqueous Ammonia Solution by The Addition of Ethylene Glycol, Glycerol and Glycine to The CO₂ Absorption Process, Journal of Environmental Sciences 24(3) (2012) 494-498
- Shakashiri, Carbon Dioxide,CO₂ , *Chemical of the Week* (2008).
- Shen. S, Feng. X, Zhao. R, Kinetic Study of Carbon Dioxide Absorption with Aqueous Potassium Carbonate Promoted by Arginine, Chemical Engineering Journal 222 (2013) 478-487
- Thee. H, Smith. K.H, Silva. da Gabriel, Kentish, S.E, Carbon Dioxide Absorption into Unpromoted and Borate-

- Catalyzed Potassium Carbonate Solutions ,Chemical Engineering Journal 181-182 (2012) 604-701
- Wibawa. Gede, Gunawan. Setiyo, Cryogenic Freeze-Out Area Heat Exchanger Sebagai Salah Satu Alternatif Pencairan dan Penghilangan CO₂ pada Liquified Natural Gas Skala Kecil dan Sedang, Pusat Studi Energi dan Rekayasa Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (2011).
- Wang. M, Lawal. A, Stephenson. P, Post-combustion CO₂ Capture with Chemical Absorpstion: A State-of-the-Art Review, Chemical Engineering Research and Design 89, (2011) 1609-1624.
- Yi. Fei, Zou. Hai-Kui, Chu. Guang-Wen, Shao. Lei, Modeling and Experimental Studies on Absorption of CO₂ by Benfield Solution in Rotating Packed Bed, Chemical Engineering Journal 145 (2009) 377-384
- Yih. S.M, Sun. C.C, Simultaneous Absorption of Hydrogen Sulphide and Carbon Dioxide into Potassium Carbonate Solution with or without Amine Promoters, The Chemical Engineering Journal 34 (1987) 65-72

BAB V

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian data kinetika reaksi absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine* berpromotor *glycine* menggunakan peralatan *wetted wall column* pada temperatur 303,15 K – 328,15 K dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Kenaikan temperatur dari 303,15 K hingga 328,15 K akan meningkatkan laju absorpsi gas karbon dioksida berpromotor *glycine* sebesar 24,2%.
2. Kenaikan konsentrasi promotor *glycine* dari 1% berat sampai 3% berat dalam larutan *diethanolamine* menghasilkan kenaikan laju absorpsi gas karbon dioksida sebesar 59,764%. Sehingga penambahan *glycine* sebagai promotor dapat menambah laju absorpsi karbon dioksida pada larutan *diethanolamine* dan mampu menutupi kelemahan larutan *diethanolamine*.
3. Dari penelitian ini didapatkan persamaan konstanta kinetika reaksi untuk *glycine* yaitu $k_{glycine} = 1.419 \times 10^{12} \exp(-3634/T) (\text{m}^3/\text{kmol.s})$.



Halaman ini sengaja dikosongkan

APPENDIKS A

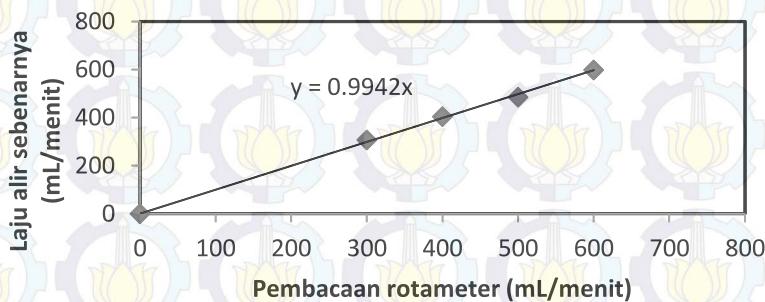
A.1 Kalibrasi Rotameter Liquid

Sebelum dilakukan penelitian, terlebih dahulu dilakukan kalibrasi peralatan rotameter liquid. Dari hasil kalibrasi peralatan, diperoleh data laju alir sebagai berikut :

Tabel A.1 Data kalibrasi rotameter liquid

Pembacaan rotameter (ml/menit)	Laju alir sebenarnya (ml/menit)
0	0
300	307
400	404
500	485
600	598

Berdasarkan hasil pengukuran di atas, diperoleh grafik kalibrasi rotameter liquid yang ditunjukkan pada gambar A.1



Gambar A.1 Kalibrasi Rotameter liquid

Sehingga didapatkan persamaan kalibrasi rotameter berdasarkan Gambar A.1 adalah $y = 0.9942x$

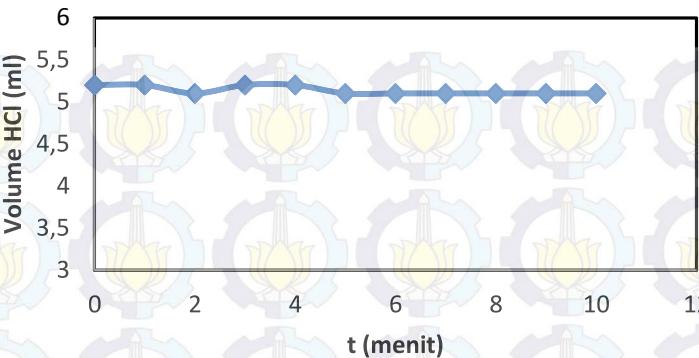
A.2 Menentukan Keadaan Steady State

Keadaan steady state merupakan kondisi dimana tidak ada perubahan konsentrasi dan tidak dipengaruhi oleh waktu. Berdasarkan penelitian didapatkan hubungan konsentrasi tiap waktunya seperti yang didapatkan sebagai berikut :

Tabel A.2 Data volume HCl sebagai penitran dalam titrasi

Waktu (menit)	Volume penitranHCl (mL)
Awal	4,9
0	5,2
1	5,2
2	5,1
3	5,2
4	5,2
5	5,1
6	5,1
7	5,1
8	5,1
9	5,1
10	5,1

Sehingga dapat dibuat grafik hubungan volume HCl dengan waktu sebagai berikut :



Gambar A.2 Pembacaan Keadaan Steady State

Berdasarkan **Gambar A.2** dapat diketahui bahwa kondisi steady state dicapai pada waktu $t = 5$ menit. Sehingga pengambilan sampel pada penelitian ini dilakukan pada saat $t = 5$ menit.

A.3 Analisa Data

Berikut adalah contoh perhitungan hasil eksperimen pada variable konsentrasi promoter *glycine* (1% w/w). Laju alir pelarut 200 ml/menit dan suhu 30°C (303.15 K)

Analisa Awal Larutan :

Untuk pembuatan pelarut, campuran DEA, glycine dan aquadest dapat dibuat dengan perhitungan, contoh:

Basis : 2000g

DEA(30%)	:	600	g
Glycine(1%)	:	20	g
Aquadest	:	1380	g
Total	:	2000	g

Untuk menganalisa adanya kandungan karbonat dan bikarbonat mula-mula dalam larutan, dilakukan titrasi menggunakan asam klorida (HCl) dengan indicator PP dan MO. Titrasi pertama bertujuan untuk mengetahui kandungan karbonat mula – mula sebagai berikut :

Volume sampel larutan : 10 mL

Molaritas HCl : 2 M

Volume HCl (V_{HCl})_{PP} : 5 mL

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol karbonat mula – mula dalam 10 mL sampel larutan yaitu :

$$[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{mula-mula}} = \frac{M_{HCl} \times V_{HCl} (\text{PP}) \times \text{faktor pengenceran}}{V_{\text{sampel}}} \\ = \frac{2 \text{ M} \times 5 \text{ mL} \times 2}{10 \text{ mL}} \\ = 2 \text{ mmol/mL} \approx 2 \text{ kmol/m}^3$$

Titrasi kedua bertujuan untuk mengetahui kandungan bikarbonat mula-mula sebagai berikut :

Volume sampel larutan : 10 mL

Molaritas HCl : 2 M

Volume HCl (V_{HCl})_{MO} : 5 mL

Volume HCl (V_{HCl})_{MO-PP}: 0 mL

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol bikarbonat mula – mula dalam 10 mL sampel larutan yaitu :

$$[\text{HCO}_3^-]_{\text{mula-mula}} = \frac{M_{HCl} \times V_{HCl} (\text{PP}) \times \text{faktor pengenceran}}{V_{\text{sampel}}} \\ = \frac{2 \text{ M} \times 0 \text{ mL} \times 2}{10 \text{ mL}} \\ = 0 \text{ mmol/mL} \approx 0 \text{ kmol/m}^3$$

Analisa Akhir Larutan :

Untuk menganalisa adanya kandungan karbonat dan bikarbonat akhir dalam larutan, dilakukan titrasi menggunakan asam klorida (HCl) dengan indicator PP dan MO. Titrasi

pertama bertujuan untuk mengetahui kandungan karbonat akhir sebagai berikut :

Volume sampel larutan : 10 mL

Molaritas HCl : 2 M

Volume HCl (V_{HCl})_{PP} : 5.15 mL

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol karbonat akhir dalam 10 mL sampel larutan yaitu:

$$\text{Mol } \text{CO}_3^{2-}\text{akhir} = \frac{M_{HCl} \times V_{HCl(PP)} \times \text{faktor pengenceran}}{V_{\text{sampel}}} =$$

$$\frac{2 \text{ M} \times 5.15 \text{ mL} \times 2}{10 \text{ mL}}$$

$$= 2.06 \text{ mmol/mL} \approx 2.06 \text{ kmol/m}^3$$

Titrasi kedua bertujuan untuk mengetahui kandungan bikarbonat akhir sebagai berikut:

Volume sampel larutan : 10 mL

Molaritas HCl : 2 M

Volume HCl (V_{HCl})_{MO} : 5.35 mL

Volume HCl (V_{HCl})_{MO-PP} : 0.2 mL

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol bikarbonat mula-mula dalam 10 mL sampel larutan yaitu :

$$\text{Mol } \text{HCO}_3^- \text{akhir} = \frac{M_{HCl} \times V_{HCl(PP)} \times \text{faktor pengenceran}}{V_{\text{sampel}}} =$$

$$\frac{2 \text{ M} \times 0.2 \text{ mL} \times 2}{10 \text{ mL}} = 0.08 \text{ mmol/mL} \approx 0.08 \text{ kmol/m}^3$$

Menentukan Konsentrasi Gas Karbondioksida Terlarut [CO_2]_e dan Konsentrasi [OH]

$$\log K_1 = \left(-\frac{3404,7}{T} + 14,843 - 0,03279T \right)$$

$$K_2 = \exp \left(-294,74 + \frac{3,6439 \times 10^5}{T} - \frac{1,8416 \times 10^8}{T^2} + \frac{4,1579 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{3,5429 \times 10^{12}}{T^4} \right)$$

$$K_w = \exp \left(39,555 - \frac{9,879 \times 10^4}{T} + \frac{5,6883 \times 10^7}{T^2} - \frac{1,465 \times 10^{10}}{T^3} + \frac{1,3615 \times 10^{12}}{T^4} \right)$$

$$K_b = \exp(-3071,15/T + 6.77 \ln T + (-48.76))$$

$$K_{eq} = \exp \left(-\frac{17067.2}{T} + (-66.8 \ln T) + 439.71 \right)$$

Dimana :

$$T = 30^\circ C = 303.15 K$$

$$[CO_3^{2-}]_{rata-rata} = \frac{(2-2.06)}{2} = 2.03 \text{ kmol/m}^3$$

$$[HCO_3^-] = 0.08 \text{ kmol/m}^3$$

Didapatkan nilai $K_1 = 4.6950 \times 10^{-7}$ kmol/m³, $K_w = 1.4907 \times 10^{-14}$ kmol²/m⁶, $K_b = 1.75 \times 10^{-9}$ kmol/m³, $K_c = 2.3 \times 10^{-4}$ kmol/m³, $K_{eq} = 5.47$ kmol/m³ dan

$k_2 = 5.156 \times 10^{-11}$ kmol/m³. Sehingga konsentrasi CO₂ terlarut pada suhu 303.15 K adalah :

$$\begin{aligned} [CO_2]_e &= \frac{K_c K_2}{K_{eq} K_1} \frac{[HCO_3^{2-}]^2}{[CO_3^{2-}]} \\ &= \frac{0.00023 \text{ kmol/m}^3 \times 5.156 \times 10^{-11} \text{ kmol/m}^3}{5.47 \text{ kmol/m}^3 \times 4.6950 \times 10^{-7} \text{ kmol/m}^3} \frac{(0.08 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3})^2}{(2.03 \text{ kmol/m}^3)} \\ &= 3.46226E-09 \text{ kmol/m}^3 \end{aligned}$$

Menentukan Laju Absorpsi Gas Karbondioksida

$$\begin{aligned} \text{Laju alir pelarut (v)} &= 200 \text{ ml/menit} \\ &= 3.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{mula-mula}} &= 2 \text{ kmol/m}^3 \\
 [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{akhir}} &= 2.06 \text{ kmol/m}^3 \\
 [\text{HCO}_3^{2-}]_{\text{awal}} &= 0 \text{ kmol/m}^3 \\
 [\text{HCO}_3^{2-}]_{\text{akhir}} &= 0.08 \text{ kmol/m}^3
 \end{aligned}$$

Sehingga laju absorpsi gas karbondioksida adalah :

$$\begin{aligned}
 q &= v \times [([\text{CO}_3^{2-}]_{\text{mula-mula}} - [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{akhir}}) + ([\text{HCO}_3^{2-}]_{\text{akhir}} - [\text{HCO}_3^{2-}]_{\text{awal}})] \\
 &= (3.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{menit}) \times [(2.06 \text{ kmol/m}^3) - (2 \text{ kmol/m}^3)] + [(0.08 \text{ kmol/m}^3) - (0 \text{ kmol/m}^3)] \\
 &= 4.66667 \times 10^{-7} \text{ kmol/det}
 \end{aligned}$$

Menentukan Waktu Kontak

$$t_c = \frac{h}{U_s} = \frac{2h}{3} \left[\frac{3\mu}{g\rho} \right]^{1/3} \left[\frac{\pi d}{v} \right]^{2/3}$$

Dimana,

$$h = 0.093 \text{ m}$$

$$\mu_{\text{larutan}} = 0.002411 \text{ kg/m.s}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$\rho_{\text{larutan}} = 1036 \text{ kg/m}^3$$

$$d = 0.013 \text{ m}$$

$$v = 200 \text{ ml/menit} \approx 3.333 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det}$$

$$\pi = 3.14$$

Sehingga waktu kontak antara gas dengan larutan adalah :

$$\begin{aligned}
 t_c &= \frac{2(0.093 \text{ m})}{3} \left[\frac{3(0.002411 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}})}{(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(1036 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})} \right]^{1/3} \left[\frac{(3.14)(0.013 \text{ m})}{(3.333 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det})} \right]^{2/3} \\
 &= 0.294115772 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

Menentukan Laju Rata-Rata Absorpsi Selama t Waktu

$$\frac{Q(t)}{t} = \frac{q}{\pi dh}$$

dimana,

$$q = 4.66667 \text{E-}07 \text{ kmol/detik}$$

$$h = 0.013 \text{ m}$$

$$d = 0.093 \text{ m}$$

Maka, laju rata-rata absorpsi yang didapat selama t waktu ($Q(t)/t$) adalah :

$$\frac{Q(t)}{t} = \frac{4.66667 \text{E-}07 \text{ kmol/det}}{(3.14)(0.093 \text{ m})(0.013 \text{ m})}$$
$$= 0.000122928 \text{ kmol/m}^2$$

Menentukan Konstanta Henry

Harga konstanta Henry didapat dari persamaan berikut :

$$\log\left(\frac{He}{He^0}\right) = h_1 I_1 + h_2 I_2$$

dimana, He^0 adalah konstanta henry untuk sistem gas-cair dan I adalah kekuatan ionic dari larutan yang diperoleh dari :

$$He^0 = H_{e298} \exp\left[\frac{-d \ln kH}{d\left(\frac{1}{T}\right)} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right]$$

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2$$

C_i adalah konsentrasi ion – ion yang valensinya Z_i .

$$h = h_+ + h_- + h_G$$

$$h_G = h_{G,o} + h_T(T-298.15)$$

Namun pada pelarut DEA ini tidak terionisasi sehingga $I=0$

$$\log\left(\frac{He}{He^0}\right) = 0$$

$$He = He^0$$

Sehingga, konstanta Henry dapat dihitung sebagai berikut :

$$He^0 = 3.6 * (10^5) \exp(2200 * (1/303.15 - 1/298))$$

$$= 3.17566 \text{E-}05 \text{ mol/cm}^3 \cdot \text{atm}$$

$$= 3.17566 \text{E-}07 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{Pa}$$

$$= 3148947.125 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa/kmol}$$

Menentukan Diffusivitas CO_2 dan CO_3^{2-}

- Diffusivitas CO_2 dan CO_3^{2-} dalam air dapat dihitung menggunakan persamaan Wilke Chang (Wilke dan Chang, 1955) sebagai berikut :

$$D_{AL(\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O})} = 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_B)} \frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}}$$

dimana, φ = association parameter dari pelarut (water = 2.6)

M_B = Berat molekul pelarut (kg/kmol)

T = Suhu operasi (K)

μ_B = viskositas pelarut (kg/m.s)

V_A = Solute molar volume (m^3/kmol)

$$D_{AL(\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O})} = 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_B)} \frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}} = \\ 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(2.6)(18 \text{ kg/kmol})} \frac{303.15 \text{ K}}{\left(0.8007 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}\right) \left(34 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kmol}\right)^{0.6}} \\ = 2.31058 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{det}$$

*Dengan cara yang sama, didapatkan $D_{BL(\text{CO}_3^{2-}-\text{H}_2\text{O})}$ sebesar $1.04496 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{det}$

- Diffusivitas CO_2 dalam gas N_2 didapat dari tabel 6.2-1 (Geankoplis,1993) pada suhu

298 K sebesar $0.167 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{det}$, sehingga perlu dilakukan koreksi suhu sebagai berikut:

$$\left(\frac{D_{AG,T}}{D_{AG,T_o}} \right) = \left(\frac{T}{T_o} \right)^{1,75}$$

Sehingga, diffusivitas CO_2 dalam gas $\text{N}_2(D_{AG})$ pada suhu 303.15 K adalah:

$$\left(\frac{D_{AG, 303.15 \text{ K}}}{0.167 \times 10^{-4}} \right) = \left(\frac{303.15 \text{ K}}{298.15 \text{ K}} \right)^{1,75}$$

$$(D_{AG, \ 303.15\ K}) = \left(\frac{303.15\ K}{298.15\ K} \right)^{1.75} \times 0.167 \times 10^{-4}$$

$$(D_{AG, \ 303.15\ K}) = 1.71932 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{det}$$

Menentukan Koefisien Perpindahan Massa sisi Gas (k_g)

$$k_g = \frac{Sh D_{AG}}{R T d}$$

dimana,

$$\begin{aligned} Sc &= \text{Schmidt number} = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{AG}} \\ &= \frac{1.73772 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}}{1.25774 \frac{kg}{m^3} \times 1.71932 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{det}} = 0.804 \end{aligned}$$

$$v = \frac{4 Q_G}{\pi x d^2} = \frac{4 \times (0.0001 \frac{m^3}{s})}{\pi x (0.013 m)^2} = 0.753778 \frac{m}{s}$$

dimana Q_G (laju alir gas) = 6 L/min = 0.0001 m^3/s

Re = Reynold number

$$\begin{aligned} &\frac{\rho_g v d}{\mu_g} \\ &= \frac{1.25774 \frac{kg}{m^3} \times 0.753778 \frac{m}{s} \times 0.013 m}{1.73772 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}} \\ &= 709.2467 \end{aligned}$$

Sh = Sherwood number

$$\begin{aligned} &= 1.075 (Re Sc \frac{d}{h})^{0.85} \\ &= 1.075 (709.2467 \times 0.804 \times \frac{0.013 m}{0.093 m})^{0.85} \\ &= 44.41 \end{aligned}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} k_g &= \frac{44.41 \times 1.71932 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{det}}{8314 \frac{m^3 Pa}{kg mol.K} \times 303.15 K \times 0.013 m} \\ &= 2.33051 \times 10^{-8} \text{ kmol/s.m}^2.\text{Pa} \end{aligned}$$

Menentukan Koefisien Perpindahan Massa Sisi Cairan (k_L)

$$k_L = 0.422 \sqrt{\frac{D_{AL} \times \Gamma}{\rho (B_F)^2}}$$

dimana,

Γ = liquid-flow rate, (kg/m.s) based on wetted perimeter

ρ = liquid density, (kg/m³)

h = panjang area kontak, (m)

μ = viskositas liquid, (kg/m.s)

g = gravity acceleration, (9.80665 m/s²)

k_L = koefisien perpindahan massa sisi cairan, (kmol/s.m²)

$$\Gamma = \frac{Q_G \times \rho_L}{h} = \frac{3.333 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} \times 1036 \text{ kg/m}^3}{0.093 \text{ m}} = 0.042939 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$$

$$B_F = \left\{ \frac{3 \mu_L \Gamma}{\rho^2 g} \right\}^{1/3}$$

$$B_F = \left\{ \frac{3 \times \left(0.002411 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \right) \times (0.042939 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}})}{(1036 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})^2 \times (9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})} \right\}^{1/3} = 0.000309002 \text{ m}$$

Sehingga,

$$k_L = 0.422 \sqrt{\frac{2.31058 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times 0.042939 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}}{1036 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (0.000309002 \text{ m})^2}} = 0.000422628 \text{ kmol/s.m}^2$$

Menentukan Konsentrasi CO₂ dalam Interface (C_{Ai}) dan Konstanta Kecepatan Reaksi Overall Pseudo First Order (k_{ov})

$$C_{Ai} = \frac{k_g P_A + C_{Ae} \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \quad \dots \dots \dots \text{(a)}$$

$$\frac{Q}{t} = \bar{R} = (C_{Ai} - C_{Ae}) \sqrt{D_{AL} x k_{ov}} \quad \dots \dots \dots \text{(b)}$$

dimana,

k_g = Koefisien perpindahan massa sisi gas,
(kmol/s.m².Pa)

P_A = Tekanan parsial gas CO₂, (Pa)

C_{Ae} = Konsentrasi gas CO₂ berkesetimbangan
dalam cairan,(kmol/m³)

D_{AL} = Koefisien difusi gas CO₂, (m²/det)

He = Konstanta Henry , (Pa.m³/kmol)

Misal : $\varphi = \sqrt{D_{AL} x k_{ov}}$

Substitusikan pers (a) → (b)

$$\begin{aligned} \frac{Q}{t} &= \left(\frac{k_g P_A + C_{Ae} \varphi}{k_g H_e + \varphi} - C_{Ae} \right) \varphi \\ &= \left(\frac{k_g P_A + C_{Ae} \varphi - C_{Ae} k_g H_e - C_{Ae} \varphi}{k_g H_e + \varphi} \right) \varphi \\ &= \left(\frac{k_g P_A - C_{Ae} k_g H_e}{k_g H_e + \varphi} \right) \varphi \end{aligned}$$

$$\frac{Q}{t} k_g H_e + \frac{Q}{t} \varphi = k_g P_A \varphi - C_{Ae} k_g H_e \varphi$$

$$\varphi = \frac{\frac{Q}{t} k_g H_e}{k_g P_A - C_{Ae} k_g H_e - \frac{Q}{t}} = 6.99 \times 10^{-3} \text{ m/det}$$

Sehingga,

$$\varphi = \sqrt{D_{AL} x k_{ov}}$$

$$\varphi^2 = D_{AL} x k_{ov}$$

$$k_{ov} = \varphi^2 / D_{AL}$$

$$= (0.025824868 \text{ m/det})^2 / 2.31058 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{det}$$

$$= 288638.908 \text{ det}^{-1}$$

$$C_{Ai} =$$

$$\frac{k_g P_A + C_{Ae} \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \frac{\left(2.33051 \times 10^{-8} \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}\right) (0.2 \times 101325 \text{ Pa}) + (3.46 \times 10^{-9}) \sqrt{\left(2.31058 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{det}}\right) (288638.908/\text{det})}}{\left(2.33051 \times 10^{-8} \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}\right) \left(3148947.125 \text{ m}^3 \frac{\text{Pa}}{\text{kmol}}\right) + \sqrt{\left(2.31058 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{det}}\right) (288638.908/\text{det})}}$$

$$= 0.00476041 \text{ kmol/m}^3$$

Menentukan apparent reaction rate constant (k_{app})

$$\begin{aligned} \log_{10} k_{OH^-} &= 13,635 - \frac{2895}{T} \\ &= 13,635 - \frac{2895}{303.15 K} \\ k_{OH^-} &= 12169.4834 \text{ m}^3/\text{kmol.det} \\ [\text{OH}^-] &= \frac{K_w [CO_3^{2-}]}{K_2 [HCO_3^-]} \\ &= \frac{1.4907 \times 10^{-14} \text{ kmol}^2/\text{m}^6}{5.156 \times 10^{-11} \text{ kmol}/\text{m}^3} \frac{(2.03 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3})}{(0.08 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3})} \\ &= 0.00733647 \text{ kmol}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

Konsentrasi 1% glycine dalam 1000 gr larutan DEA dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{BM glycine} = 75.07 \text{ g/mol}$$

$$\rho_{\text{larat.}} = 1036 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{1 \text{ kg}}{v} = 1036 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 965 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$= 0.965 \text{ L}$$

$$\text{Mol glycine} = 10/75.05 = 0.133 \text{ mol}$$

$$\text{Molaritas glycine} = 0.133 \text{ mol}/0.965 \text{ L} = 0.138 \text{ mol/liter}$$

$$\begin{aligned} k_{app} &= k_{ov} - k_{OH^-} [\text{OH}^-] - k_{DEA} [\text{DEA}] \\ &= (288638.908) - \{(12169.4834) \times \\ &\quad (0.00733647)\} - (2611.987) \\ &= 288549.6276 \text{ det}^{-1} \end{aligned}$$

Pembuktian Regim Reaksi Cepat Pseudo First Order

Kondisi reaksi pada absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine* berpromotor umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai yaitu $3 < \frac{H_a}{E_i} < \frac{1}{2}$ Ei (Danckwerts, 1970; Lin dkk, 2009) :

$$H_a = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L}$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{C_{B0}}{z C_{Ai}} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad \text{dimana,}$$

k_{ov} = Konstanta kecepatan reaksi overall pseudo first order, (det^{-1})

D_{AL} = Diffusivitas CO_2 dalam H_2O , (m^2/det)

D_{BL} = Diffusivitas CO_3^{2-} dalam H_2O , (m^2/det)

k_L = Koefisien perpindahan massa sisi cairan, ($\text{kmol}/\text{s.m}^2$)

C_{B0} = Konsentrasi awal reaktan, (kmol/m^3)

Z = Koefisien mol reaktan yang bereaksi dengan 1 mol gas terlarut

C_{Ai} = Konsentrasi gas CO_2 dalam *interface*, (kmol/m^3)

$$\begin{aligned} H_a &= \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L} \\ &= \frac{\sqrt{(288638.9087 \text{ det}^{-1})(2.31058 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{det}})}}{(0.0004226 \frac{\text{kmol}}{\text{s.m}^2})} \\ &= 61.1 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2} E_i = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{C_{B0}}{z C_{Ai}} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 &= \\
 \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{(2.31058 x \frac{10^{-9} m^2}{det})}{(1.04496 \times 10^{-9} \frac{m^2}{det})}} + \right. \\
 &\quad \left. \frac{(2.03 \frac{kmol}{m^3})}{(1)(0.0047 \frac{kmol}{m^3})} \sqrt{\frac{(1.04496 \times 10^{-9} \frac{m^2}{det})}{(2.31058 x \frac{10^{-9} m^2}{det})}} \right\} \\
 &= 142.01
 \end{aligned}$$

Karena hasil yang didapat sudah memenuhi ketentuan yang ada $3 < Ha < \frac{1}{2} E_i$, maka TERBUKTI bahwa reaksi ini berada pada regim cepat *pseudo first order*.

Menentukan Persamaan Konstanta Kecepatan Reaksi untuk Glycine

Dari data yang didapat dari perhitungan untuk masing-masing suhu dan konsentrasi *glycine*, maka diperoleh :

Tabel A.3 Data Perhitungan Konsentrasi *Glycine* dan Konstanta Kecepatan Reaksi Apparent

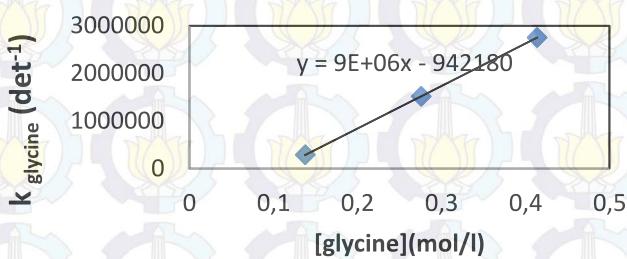
T (Kelvin)	[Glycine] (mol/L)	k _{Glycine} [Glycine], k _{app} (det ⁻¹)
303.15	1%	0.138
	2%	0.275
	3%	0.414
308.15	1%	0.138
	2%	0.275
	3%	0.414
313.15	1%	0.138
	2%	0.275

	3%	0.414	4973644
318.15	1%	0.138	1204315.331
	2%	0.275	3089710.864

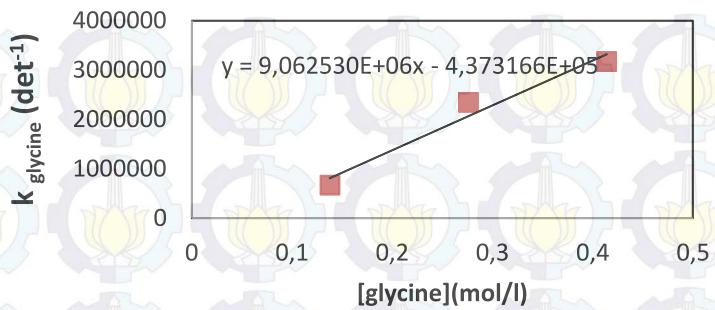
Lanjutan Tabel A.3 Data Perhitungan Konsentrasi Glycine dan Konstanta Kecepatan reaksi Apparent

T (Kelvin)	[Glycine] (mol/L)	$k_{\text{glycine}} [Glycine],$ k_{app} (det $^{-1}$)
318.15	3%	0.414
	1%	0.138
	2%	0.275
323.15	3%	0.414
	1%	0.138
	2%	0.275
328.15	3%	0.414
	1%	0.138
	2%	0.275
	3%	0.414
		7667924

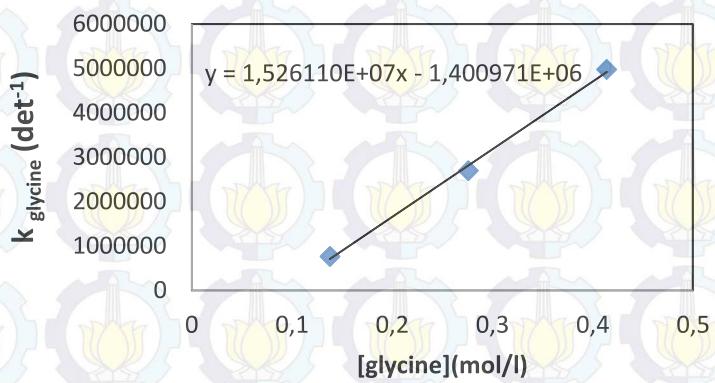
Dari data yang didapatkan pada Tabel A.3, maka dapat dibuat grafik hubungan antara k_{glycine} dengan konsentrasi glycine dalam larutan sebagai berikut :



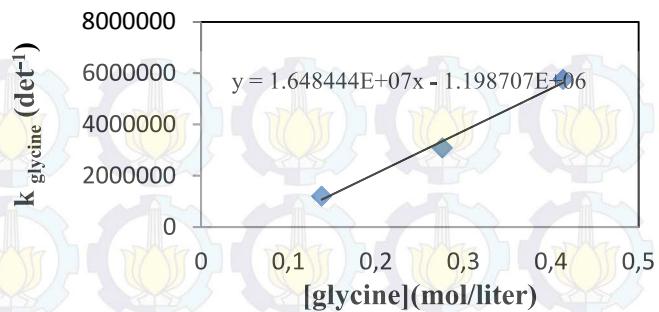
Gambar A.3 Hubungan k_{app} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 303.15 K



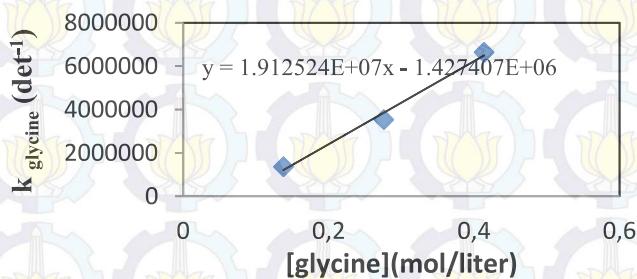
Gambar A.4 Hubungan k_{glycine} dengan $[\text{glycine}]$ dalam larutan DEA pada suhu 308.15 K



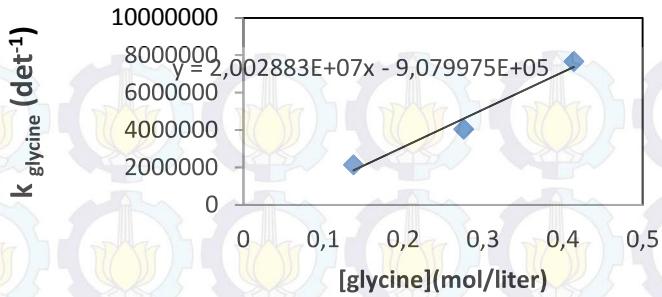
Gambar A.5 Hubungan k_{glycine} dengan $[\text{glycine}]$ dalam larutan DEA pada suhu 313.15 K



Gambar A.6 Hubungan k_{glycine} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 318.15 K



Gambar A.7 Hubungan k_{glycine} dengan [glycine] dalam larutan DEA pada suhu 323.15 K



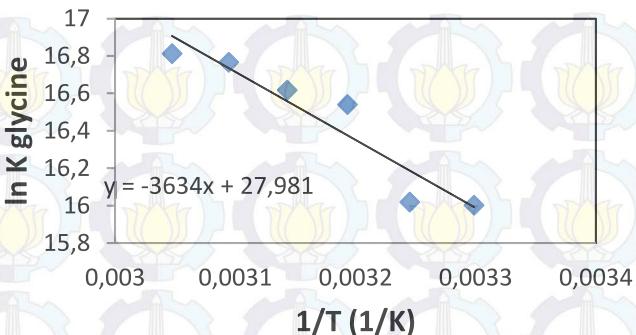
Gambar A.8 Hubungan k_{glycine} dengan $[\text{glycine}]$ dalam larutan DEA pada suhu 328.15 K

Dari Gambar A.3 sampai A.8 didapat slope untuk masing-masing grafik, dimana slope tersebut merupakan konstanta kecepatan reaksi *glycine* untuk masing-masing suhu operasi yaitu 303.15 K – 328.15 K. Setelah itu, barulah persamaan konstanta kecepatan reaksi *glycine* pada fungsi suhu dapat ditentukan dari persamaan *Arhenius* sebagai berikut :

- $k_{\text{glycine}} = A_{\text{glycine}} e^{-\frac{E}{RT}}$
- $\ln k_{\text{glycine}} = \ln A - \frac{E}{RT}$

Tabel A.4 Data konstanta kecepatan reaksi *glycine* pada suhu 303.15 K-328.15 K

T (K)	Slope = k_{glycine}	1/T	$\ln k_{\text{glycine}}$
303.15	8.91E+06	0.0033	16.002927
308.15	9.06E+06	0.00325	16.019659
313.15	1.53E+07	0.00319	16.540818
318.15	1.65E+07	0.00314	16.617927
323.15	1.91E+07	0.00309	16.766519
328.15	2.00E+07	0.00305	16.812683



Gambar A.9 Hubungan $\ln k_{\text{glycine}}$ dengan $1/T$ pada persamaan *Arhenius*

Dari **Gambar A.9** didapatkan persamaan garis : $y = -3634x + 27.98$, maka :

$$\text{Slope} = -\frac{E}{R} = -3634$$

$$\text{Intercept} = \ln A$$

$$\ln A = 27.98$$

$$A = 1.419 \times 10^{12}$$

Sehingga didapatkan persamaan k_{glycine} sebagai berikut :

$$k_{\text{glycine}} \text{ (m}^3/\text{kmol.s)} = 1.419 \times 10^{12} e^{-\frac{3634}{T}}$$

APPENDIKS B

B.1 Hasil Analisa Menggunakan Metode Titrasi

Tabel B.1 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan promotor *glycine* pada konsentrasi 1% berat

T (K)	Molaritas HCl (M)	Vol HCl (pp)	Vol HCl (mo)	$[CO_3^{2-}]$ awal (mmol/mL)	$[HCO_3^-]$ (mmol/mL)	$[CO_3^{2-}]$ akhir (mmol/mL)	$[CO_3^{2-}]$ rata-rata (mmol/mL)
303.15	2	5.15	5.35	2	0.08	2.06	2.03
308.15	2	5.25	5.35	2	0.04	2.1	2.05
313.15	2	5.25	5.4	2	0.06	2.1	2.05
318.15	2	5.3	5.4	2	0.04	2.12	2.06
323.15	2	5.3	5.4	2	0.04	2.12	2.06
328.15	2	5.35	5.4	2	0.02	2.14	2.07

Tabel B.2 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan promotor *glycine* pada konsentrasi 2%

T (K)	Molaritas HCl (M)	Vol	Vol	$[CO_3^{2-}]$ awal	$[HCO_3^-]$	$[CO_3^{2-}]$ akhir	$[CO_3^{2-}]$ rata-rata
		HCl (pp)	HCl (mo)	(mmol/mL)	(mmol/mL)	(mmol/mL)	(mmol/mL)
303.15	2	5.45	5.6	2	0.06	2.18	2.09
308.15	2	5.5	5.65	2	0.06	2.22	2.11
313.15	2	5.55	5.65	2	0.04	2.22	2.11
318.15	2	5.55	5.65	2	0.04	2.22	2.11
323.15	2	5.6	5.65	2	0.04	2.24	2.12
328.15	2	5.6	5.65	2	0.02	2.24	2.12

Tabel B.3 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan promotor *glycine* pada konsentrasi 3% berat

T (K)	Molaritas HCl (M)	Vol HCl (pp)	Vol HCl (mo)	$[CO_3^{2-}]$ awal (mmol/mL)	$[HCO_3^-]$ (mmol/mL)	$[CO_3^{2-}]$ akhir (mmol/mL)	$[CO_3^{2-}]$ rata-rata (mmol/mL)
303.15	2	5.85	6	2	0.06	2.34	2.17
308.15	2	5.85	6	2	0.06	2.34	2.17
313.15	2	5.85	5.95	2	0.04	2.34	2.17
318.15	2	5.9	6.05	2	0.06	2.36	2.18
323.15	2	5.9	6.05	2	0.06	2.36	2.18
328.15	2	5.9	6.05	2	0.06	2.36	2.18

Tabel B.4 Data perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ dengan DEA murni

T (K)	Molaritas HCl (M)	Vol HCl (pp)	Vol HCl (mo)	$[CO_3^{2-}]$ awal (mmol/mL)	$[HCO_3^-]$ (mmol/mL)	$[CO_3^{2-}]$ akhir (mmol/mL)	$[CO_3^{2-}]$ rata-rata (mmol/mL)
303.15	2	5	5.05	2	0.06	2	2
308.15	2	5	5.05	2	0.06	2	2
313.15	2	5.05	5.1	2	0.04	2.02	2.01
318.15	2	5.05	5.1	2	0.06	2.02	2.01
323.15	2	5.1	5.15	2	0.06	2.04	2.02
328.15	2	5.1	5.15	2	0.06	2.04	2.02

B.2 Nilai Konstanta Henry

Tabel B.5 Data perhitungan konstanta Henry pada berbagai variabel suhu

T(K)	$(-\frac{d \ln Kh}{d(1/T)})$	$((\frac{1}{T}) - (\frac{1}{298}))$	$\text{EXP}((-\frac{d \ln Kh}{d(1/T)}) \times ((\frac{1}{T}) - (\frac{1}{298})))$	He_{298}	$He^{\circ t}(\text{mol/cm}^3.\text{atm})$	$(\text{m}^3.\text{pa}/\text{kmol})$
303.	-5.70077E-05		0.882129063		3.17566E-05	3148947.125
308.	-0.000110532		0.784138071	0.000036	2.8229E-05	3542460.036
313.	0.000162347		0.699658346		2.51877E-05	3970191.731
318.	0.000212533		0.626520914		2.25548E-05	4433655.314
323.	0.000261167		0.562948895		2.02662E-05	4934333.829
328.	0.000308318		0.507479364		1.82693E-05	5473676.32

B.3 Hasil Perhitungan Diffusivitas

Tabel B.6 Hasil perhitungan Diffusivitas

T (K)	DAL($\text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$) (m^2/det)	DAG($\text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{N}_2$) (m^2/det)	DAL($\text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$) (m^2/det)
303.15	2.310×10^{-9}	1.719×10^{-5}	1.044×10^{-9}
308.15	2.601×10^{-9}	1.769×10^{-5}	1.062×10^{-9}
313.15	2.913×10^{-9}	1.819×10^{-5}	1.079×10^{-9}
318.15	3.241×10^{-9}	1.870×10^{-5}	1.096×10^{-9}
323.15	3.589×10^{-9}	1.922×10^{-5}	1.113×10^{-9}
328.15	3.953×10^{-9}	1.975×10^{-5}	1.131×10^{-9}

B.4 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa

Tabel B.7 Hasil perhitungan koeffisien perpindahan massa sisi gas pada temperatur 303.15 K - 328.15K

T (K)	Sc	Re	Sh	kg (kmol/s.m ² .Pa)
303.15	0.8036	709.24	44.41	2.330×10^{-8}
308.15	0.8038	689.03	43.34	2.302×10^{-8}
313.15	0.8044	669.44	42.32	2.275×10^{-8}
318.15	0.8053	650.41	41.33	2.248×10^{-8}
323.15	0.8062	632.15	40.39	2.223×10^{-8}
328.15	0.8072	614.67	39.47	2.198×10^{-8}

Tabel B.8 Hasil perhitungan koefisien perpindahan massa sisi liquid pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor *glycine* (1; 2; 3 % berat)

Suhu (K)	K_L (kmol/s.m ²)		
	<i>glycine</i> (1% w/v)	<i>glycine</i> (2% w/v)	<i>glycine</i> (3% w/v)
303.15	0.000422628	0.000396843	0.000395633
308.15	0.000454122	0.000422795	0.000420004
313.15	0.000488304	0.000451035	0.000447167
318.15	0.000522539	0.000482739	0.000474279
323.15	0.000553299	0.000517544	0.000506701
328.15	0.000586585	0.000548482	0.000541901

Tabel B.9 Hasil perhitungan koefisien perpindahan massa sisi liquid pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% murni

Suhu (K)	K_L (kmol/s.m ²)
303.15	0.000457498
308.15	0.000491713
313.15	0.000520515
318.15	0.000554438
323.15	0.000586979
328.15	0

B.5 Laju Absorbsi, Waktu Kontak Absorbsi CO₂ dan C_{Ae}

Tabel B.10 Hasil perhitungan laju absorpsi, waktu kontak dan C_{Ae} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor glycine (1; 2; 3 % berat)

Suhu (K)	Laju absorpsi, q (kmol/det)			Waktu kontak (detik)			C _{Ae} (mmol/mL)		
	glycine (1% w/v)	glycine (2% w/v)	glycine (3% w/v)	glycine (1% w/v)	glycine (2% w/v)	glycine (3% w/v)	glycine (1% w/v)	glycine (2% w/v)	glycine (3% w/v)
303.15	0.00000046	0.00000080	0.00000093	0.29411577	0.31282445	0.31338	0.000000346	0.00000018	0.00000018
308.15	0.00000060	0.00000086	0.00000093	0.29348189	0.31000351	0.31226	0.00000085	0.00000018	0.00000018
313.15	0.00000060	0.00000086	0.00000100	0.28565195	0.30886063	0.31113	0.000000192	0.00000008	0.00000008
318.15	0.00000066	0.00000086	0.00000100	0.28157065	0.30420227	0.30943	0.00000085	0.00000008	0.00000018
323.15	0.00000066	0.00000086	0.00000100	0.27983465	0.29878505	0.30479	0.00000085	0.00000002	0.00000001
328.15	0.00000073	0.00000086	0.00000100	0.27701141	0.29568861	0.29909	0.00000021	0.00000002	0.00000001

Tabel B.11 Hasil perhitungan laju absorpsi, waktu kontak dan C_{Ae} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% murni

Suhu (K)	Laju absorpsi, q (kmol/det)	Waktu kontak (detik)	C_{Ae} (mmol/mL)
303.15	0.00000027	0.290271	0.0000000220
308.15	0.00000027	0.285316	0.0000000220
313.15	0.00000033	0.284305	0.0000000219
318.15	0.00000033	0.280879	0.0000000219
323.15	0.00000040	0.27843	0.0000000217
328.15	0.00000040	0.275578	0.0000000217

B.6 Hasil Perhitungan Konsentrasi CO_2 dalam Interface (C_{Ai}) dan Konstanta Kecepatan Reaksi Overall Pseudo First Order (k_{ov})

Tabel B.12 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor *glycine* (1% berat)

T (K)	P (Pa)	C_{Ai}	ϕ	k_{ov}
303.15		0.00476041	0.025824868	288638.9087
308.15		0.003782936	0.041780745	670926.1928
313.15	20265.000	0.003354733	0.04711534	761978.1115
318.15		0.002809523	0.06250769	1205391.715
323.15		0.002506141	0.070074836	1367965.33
328.15		0.002096818	0.092127484	2146815.606

Tabel B.13 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor glycine (2% berat)

T (K)	P (Pa)	C_{Ai}	ϕ	k_{ov}
303.15		0.003564	0.059132855	1513339.469
308.15		0.002922	0.078141459	2346850.451
313.15		0.002577	0.088587053	2693756.576
318.15	20265.000	0.002281	0.100081988	3090104.437
323.15		0.002026	0.112689185	3537654.209
328.15		0.001805	0.12648636	4046725.159

Tabel B.14 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor *glycine* (3% berat)

T (K)	P (Pa)	Cai	ϕ	k_{ov}
303.15		0.003085	0.07969	2748444.978
308.15		0.002706	0.090847	3172056.205
313.15	20265.000	0.002188	0.120376	4973926.165
318.15		0.001929	0.136575	5754413.156
323.15		0.001706	0.154446	6645143.272
328.15		0.001513	0.174121	7668669.041

Tabel B.15 Hasil perhitungan C_{Ai} dan k_{ov} pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA(30%) murni

T (K)	P (Pa)	C_{Ai}	ϕ	k_{ov}
303.15		0.005478	0.012822	71156.78088
308.15		0.004859	0.014455	80312.59403
313.15		0.004132	0.021249	154982.1461
318.15	20265.000	0.00369	0.023795	174674.971
323.15		0.003146	0.033488	312406.9655
328.15		0.002827	0.037278	351489.7783

B.7 Hasil Perhitungan $k_{glycine}$

Tabel B.16 Hasil perhitungan $k_{glycine}$ temperatur 303,15 K – 328,15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor glycine (1; 2; 3 % berat)

Suhu (K)	$k_{glycine}$ (det ⁻¹)		
	glycine (1% w/w)	glycine (2% w/w)	glycine (3% w/w)
303.15	2748305	1513199.904	2748305
308.15	3171857	2346651.049	3171857
313.15	4973644	2693474.909	4973644
318.15	5754020	3089710.864	5754020
323.15	6644599	3537109.934	6644599
328.15	7667924	4045979.875	7667924

B.8 Hasil Perhitungan Bilangan Hatta (Ha) dan *Enhancement factor* (*Ei*)

Tabel B.17 Hasil perhitungan bilangan Hatta (Ha) dan *Enhancement factor* (*Ei*) pada temperatur 303.15 K – 328.15 K dengan konsentrasi DEA 30% dengan promotor *glycine* (1; 2; 3 % berat)

Suhu (K)	Ha			1/2 <i>Ei</i>	
	<i>glycine</i> (1% berat)	<i>glycine</i> (2% berat)	<i>glycine</i> (3% berat)	<i>glycine</i> (1% berat)	<i>glycine</i> (2% berat)
303.15	61.10545234	149.0081	201.4243	142.011618	189.4383
308.15	92.00341673	184.8213	216.2997	169.6841053	219.4679
313.15	96.48767817	196.4083	269.1977	182.2674779	237.0135
318.15	119.623057	207.3212	287.9624	207.8901653	255.8423
323.15	126.6492028	217.7382	304.8069	223.1734919	275.8639
328.15	157.0574183	230.6115	321.3158	256.0310105	297.2864