SKRIPSI – TK141581

STUDI KINETIKA ABSORPSI CO_2 KE DALAM LARUTAN MDEA BERPROMOTOR *GLYCINE* DAN *L-GLUTAMIC* ACID MENGGUNAKAN *WETTED WALL COLUMN*

Oleh :
Gigih Hary Setiawan
NRP. 02211440000077
Abdurrahman Anis Albar
NRP. 02211440000127

Dosen Pembimbing :
Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc.
NIP. 1951 08 04 1974 12 1001
Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.
NIP. 1981 07 13 2005 01 1001

DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

FINAL PROJECT – TK141581

KINETICS STUDY OF CARBON DIOXIDE ABSORPTION REACTION INTO MDEA SOLUTION WITH GLYCINE AND L-GLUTAMIC ACID PROMOTOR USING WETTED WALL COLUMN

Written by :
Gigih Hary Setiawan
NRP. 02211440000077
Abdurrahman Anis Albar
NRP. 02211440000127

Advisor :
Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc.
NIP. 1951 08 04 1974 12 1001
Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.
NIP. 1981 07 13 2005 01 1001

CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI KINETIKA ABSORPSI CO_2 KE DALAM LARUTAN MDEA BERPROMOTOR *GLYCINE* DAN *L-GLUTAMIC ACID* MENGGUNAKAN *WETTED WALL COLUMN*

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Teknik Kimia pada Program Studi S-1
Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

Gigih Hary Setiawan	**02211440000077**
Abdurrahman Anis Albar	**02211440000127**

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

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

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

SURABAYA
JULI 2018

STUDI KINETIKA ABSORPSI CO_2 KE DALAM LARUTAN MDEA BERPROMOTOR *GLYCINE* DAN *L-GLUTAMIC ACID* MENGGUNAKAN *WETTED WALL COLUMN*

Mahasiswa : Gigih Hary Setiawan (02211440000077)
Abdurrahman Anis Albar (02211440000127)
Pembimbing I : Prof.Dr.Ir. Ali Altway, M.Sc.
Pembimbing II : Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.

ABSTRAK

Absorpsi karbon dioksida (CO_2) merupakan hal yang penting dalam dunia industri, Dalam industri, khususnya industri petrokimia, minyak, dan gas alam pada prosesnya diperlukan pemisahan gas CO_2 dimana gas ini merupakan gas yang korosif *(acid gas)*. Maka penting dilakukan proses pemisahan CO_2 dari aliran gas, salah satu caranya adalah absorpsi reaktif menggunakan pelarut *methyldiethanolamine* (MDEA) berpromotor. Maka, dilakukan penelitian ini untuk memperoleh data kinetika reaksi absorpsi CO_2 dalam larutan MDEA dengan menggunakan promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* dan membandingkannya dengan data kinetika yang diperoleh dari literatur. *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* dipilih karena merupakan senyawa asam amino yang reaktif, sehingga dapat mempercepat laju reaksi MDEA. Metode yang digunakan adalah absorpsi menggunakan peralatan *wetted wall column* skala laboratorium pada tekanan 1 atm. Hasil yang didapat dari penelitian ini menunjukkan peningkatan temperatur operasi meningkatkan laju absorpsi CO_2. Selain itu, penambahan promotor kedalam larutan MDEA dapat meningkatkan laju absorpsi CO_2 secara signifikan. Semakin banyak penambahan promotor maka laju absorpsi akan semakin meningkat. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* sebagai promotor dapat menambah laju absorpsi CO_2 pada larutan MDEA dan

mampu menutupi kelemahan larutan MDEA. Maka, didapatkan persamaan konstanta laju reaksi absorpsi CO_2 dari penelitian ini adalah $k_{Glycine}$ = 1,06 x 10^{21} exp (-11604,675/T) (sistem MDEA-*Glycine-L-Glutamic Acid*), $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ = 2,9 x 10^{18} exp (-9576,504/T) (sistem MDEA- *Glycine-L-Glutamic Acid*), $k_{Glycine'}$ = 4,68 x 10^{19} exp (-10443,672/T) (sistem MDEA- *Glycine*), $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid'}$ = 3,82 x 10^{16} exp (-8040,248/T) (sistem MDEA-*L-Glutamic Acid*), dan k_{MDEA} = 7,33 x 10^{22} exp (-14784,199/T) (sistem MDEA) (m^3/kmol.det). Nilai kinetika reaksi $k_{Glycine}$ memiliki nilai k dibawah *Arginine* pada suhu 303,15 dan diatas *Arginine* pada suhu 313,15 dan 323,15. Hal yang serupa terjadi jika dibandingkan dengan *piperazine* yang juga nilai k berada dibawah *piperazine* pada suhu 303,15; namun pada suhu 313,15 memiliki nilai yang hampir sama dan diatas *piperazine* pada suhu 323,15. Dan untuk nilai $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ memiliki nilai diatas *piperazine* dan *arginine* pada semua *range* suhu.

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

KINETICS STUDY OF CARBON DIOXIDE ABSORPTION REACTION INTO MDEA SOLUTION WITH *GLYCINE* AND *L-GLUTAMIC ACID* PROMOTER USING *WETTED WALL COLUMN*

Proposed By : Gigih Hary Setiawan (02211440000077)
Abdurrahman Anis Albar (02211440000127)
Advisors : Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc.
Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D.

ABSTRACT

Carbon dioxide (CO_2) absorption is the important part in industrial.. Particularly in petrochemical, oil and gas industries, as the most contributed in CO_2 releasing, need to remove the CO_2 gas since it was the acid and corrosive gas. Since the importance of CO_2 removal from gas stream, the use of methyldiethanolamine (MDEA) with promotor is chosen as the way for reactive absorption. Thus the experiment proposed to find the CO_2 absorption kinetic velocity in MDEA solution using Glycine and L-Glutamic Acid promotor and compared it with the data from literature. Glycine and L-Glutamic Acid are chosen since they are reactive amino acid thus rising the CO_2 absorption kinetic velocity in MDEA solution. The chosen method for this experiment was absorption using wetted Wall Column in a laboratorium scale with 1 atm pressure. The purpose of this experiment was to find out the reaction kinetic data in order to optimize the CO_2 separation process in industrial world. The result from this experiment shows the increasing of operating temperature impact on the increasing of CO_2 absorption kinetic velocity. CO_2 absorption velocity is

getting faster along with more promotor addition in solution. The result also shows the addition of Glycine and L-Glutamic Acid mixture as promotor will increase the CO_2 absorption velocity in MDEA solution and adequate to cover the weakness of MDEA absorption velocity. From the experiment and data calculation, the constants equation of CO_2 absorption kinetic velocity result were $k_{Glycine} = 1{,}06 \times 10^{21} \exp(-11604{,}675/T)$ *(MDEA-Glycine-L-Glutamic Acid system),* $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid} = 2{,}9 \times 10^{18} \exp(-9576{,}504/T)$ *(MDEA-Glycine-L-Glutamic Acid system),* $k_{Glycine'} = 4{,}68 \times 10^{19} \exp(-10443{,}672/T)$ *(MDEA-Glycine system),* $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid'} = 3{,}82 \times 10^{16} \exp(-8040{,}248/T)$ *(MDEA-L-Glutamic Acid system), and* $k_{MDEA} = 7{,}33 \times 10^{22} \exp(-14784{,}199/T)$ *(MDEA system)* (m^3/kmol.s). *The kinetics value of* $k_{Glycine}$ *has a value of k below Arginine at 303.15 and above Arginine at 313.15 and 323.15. A similar case occured when compared to piperazine which also values k below piperazine at 303.15; but for the temperature of 313.15 has almost the same value and above piperazine at 323.15. For the value of* $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ *has value above piperazine and arginine in all temperature range.*

***Keywords** : Absorption, CO_2, promotor, wetted wall column*

KATA PENGANTAR

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala yang telah memberikan kekuatan sehingga kami dapat menyelesaikan Proposal Skripsi yang berjudul :

"STUDI KINETIKA ABSORPSI CO_2 KE DALAM LARUTAN MDEA BERPROMOTOR *GLYCINE* DAN *L-GLUTAMIC ACID* MENGGUNAKAN *WETTED WALL COLUMN*"

Tugas Skripsi ini merupakan salah satu syarat kelulusan Program Studi S-1 di Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pada kesempatan kali ini, kami menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Ali Altway M.Sc. selaku Dosen Pembimbing dan Kepala Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.
2. Bapak Fadlilatul Taufany, ST., Ph.D selaku Dosen Pembimbing dan Sekretaris Program Studi S-1 Departemen Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.
3. Bapak Juwari, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya.
4. Bapak dan Ibu Dosen pengajar serta seluruh karyawan Departemen Teknik Kimia.
5. Orang tua dan saudara-saudara kami serta teman - teman, atas doa, bimbingan, perhatian, dan kasih sayang yang selalu tercurah selama ini.

Kami menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan laporan ini, yang membutuhkan saran yang konstruktif demi penyempurnaannya.

Surabaya, 11 Juli 2018

Penyusun

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

COVER
LEMBAR PERSETUJUAN
ABSTRAK i
ABSTRACT iii
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR TABEL xi
BAB I PENDAHULUAN 1
I.1 Latar Belakang 1
I.2 Perumusan Masalah 4
I.3 Batasan Masalah 4
I.4 Tujuan Penelitian 5
I.5 Manfaat Penelitian 5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7
II.1 Karbon Dioksida (CO_2) 7
II.2 Teknologi Pemisahan CO_2 10
II.3 Pemilihan Pelarut dan Promotor 12
II.4 Kinetika Reaksi Absorpsi CO_2 17
II.5 Absorpsi CO_2 dalam WWC 19
II.6 Penelitian Terdahulu 21
BAB III METODE PENELITIAN 25
III.1 Deskripsi Penelitian 25
III.2 Rancangan Percobaan 26
III.2.1 Penetapan Variabel 26
III.2.2 Analisis Sampel 26
III.3 Bahan dan Alat yang Digunakan 26
III.3.1 Bahan yang Digunakan 26
III.3.2 Alat yang Digunakan 30
III.4 Langkah Percobaan 30
III.4.1 Tahap Persiapan Bahan dan Peralatan Percobaan 30

III.4.2 Tahap Pelaksanaan Percobaan Absorpsi CO_2 30
III.4.3 Evaluasi Data 33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 39
IV.1 Pengaruh Kenaikan Temperatur Terhadap Laju Absorpsi CO_2 39
IV.2 Pengaruh Rasio Promotor Terhadap Laju Absorpsi CO_2 43
IV.3 Kereaktifan Promotor pada Absorpsi CO_2 43
BAB V KESIMPULAN 51
V.1 Kesimpulan 51
V.2 Saran 52
DAFTAR PUSTAKA xix
DAFTAR NOTASI xxv
APPENDIKS A A-1
A.1 Menentukan Keadaan Steady State A-1
A.2 Analisa Data A-1
A.3 Evaluasi Data A-2
APPENDIKS B B-1
B.1 Hasil Analisa Menggunakan CO_2-Analysis Method . B-1
B.2 Hasil Perhitungan $[OH^-]$ dan $[CO_2^-]e$ B-6
B.3 Nilai Konstanta Henry B-10
B.4 Hasil Perhitungan Diffusivitas B-11
B.5 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa B-11
B.6 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan K_{ov} (1/s) B-16
B.7 Hasil Perhitungan k_{MDEA}, $k_{[OH-]}$ dan kapp B-20
B.8 Hasil Perhitungan Rezim B-21
APPENDIKS C C-1
C.1 Data Gas inlet C-1
C.2 Data Mol Gas Terabsorp C-1
C.3 Data % Recovery C-2
C.4 Grafik %Recovery C-4
LAMPIRAN (RIWAYAT HIDUP PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Struktur kimia (a) MDEA, (b) *L-Glutamic Acid*, dan (c) *Glycine* 15
Gambar II.2 Distribusi kecepatan Wetted Wall Colum (WWC). 20
Gambar III.1 Rancangan Penelitian 25
Gambar III.2 Skema Alat Wetted Wall Column 31
Gambar IV.1 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 1:1 40
Gambar IV.2 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 1:2 41
Gambar IV.3 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 2:1 41
Gambar IV.4 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 0:1 42
Gambar IV.5 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 1:0 42
Gambar IV.6 Hubungan nilai k dengan T(K) pada absorpsi CO_2 dalam berbagai pelarut dan promotor yang diperoleh dari penelitian ini dan literatur pada temperatur 303.15 – 323.15 K 49
Gambar C.1 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor komposisi 1:1 pada suhu 303.15 – 323.15 K C-4
Gambar C.2 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor komposisi 1:2 pada suhu 303.15 – 323.15 K C-5
Gambar C.3 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor komposisi 2:1 pada suhu 303.15 – 323.15 K C-6

Gambar C.4 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor komposisi 0:1 pada suhu 303.15 – 323.15 K C-7
Gambar C. 5 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO2 dengan variasi % berat promotor komposisi 1:0 pada suhu 303.15 – 323.15 K C-8

DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Karakteristik Fisik CO_2 7
Tabel II.2 Spesifikasi Batas Konsentrasi Gas CO_2 dalam Proses Industri 9
Tabel II.3 Sifat-sifat Fisik MEA, DEA, dan MDEA 14
Tabel II.4 Perbandingan MEA, DEA, dan MDEA 14
Tabel II.5 Persamaan Konstanta Kecepatan Reaksi untuk Berbagai Sistem dari Peneliti Terdahulu 21
Tabel IV.1 Perbandingan persamaan konstanta laju reaksi absorpsi CO_2 pada berbagai macam pelarut dan promotor 46
Tabel A.1 Data Pengukuran pH larutan setiap waktu A-1
Tabel A.2 Data Perhitungan K_{app} Prediksi Untuk Suhu 303.15 K A-14
Tabel A.3 Data $k_{Glycine}$ untuk Sistem Campuran pada Setiap Suhu A-15
Tabel A.4 Data $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ untuk Sistem Campuran Pada Setiap Suhu A-15
Tabel A.5 Data Perhitungan K_{app} Prediksi untuk Promotor Glycine pada Sistem Murni untuk Suhu 303.15 K A-16
Tabel A.6 Data Perhitungan Kapp Prediksi Untuk Promotor L-Glutamic Acid Pada Sistem Murni Untuk Suhu 303.15 K A-17
Tabel A.7 Data $k_{Glycine}$ untuk Sistem Murni Pada Setiap Suhu A-17
Tabel A.8 Data $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ untuk Sistem Murni Pada Setiap Suhu A-17
Tabel A.9 Data k_{MDEA} Setiap Suhu A-18
Tabel B.1 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:1 ..... B-1
Tabel B.2 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:2 ..... B-1

Tabel B.3 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1 ..... B-2
Tabel B.4 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1 ..... B-2
Tabel B.5 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0 ..... B-3
Tabel B.6 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:1 ..... B-3
Tabel B.7 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:2 ..... B-4
Tabel B.8 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1 ..... B-4
Tabel B.9 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1 ..... B-5
Tabel B.10 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0 ..... B-5
Tabel B.11 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada MDEA 40% berat B-6
Tabel B.12 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:1 ..... B-6
Tabel B.13 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:2 ..... B-7
Tabel B.14 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1 ..... B-7

Tabel B.15 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1 ..... B-7
Tabel B.16 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0 ..... B-8
Tabel B.17 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:1 ..... B-8
Tabel B.18 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:2 ..... B-8
Tabel B.19 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1 ..... B-9
Tabel B.20 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1 ..... B-9
Tabel B.21 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0 ..... B-9
Tabel B.22 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada MDEA 40% berat B-10
Tabel B.23 Data Perhitungan Konstanta Henry Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 K – 323.15 K B-10
Tabel B.24 Hasil Perhitungan Diffusivitas Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 – 323.15 K B-11
Tabel B.25 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Sisi Gas Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 - 323.15 K B-11
Tabel B.26 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 1:1 ..... B-12

Tabel B.27 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 1:2 ..... B-12
Tabel B.28 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 2:1 ..... B-12
Tabel B.29 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 0:1 ..... B-13
Tabel B.30 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 1:0 ..... B-13
Tabel B.31 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 1:1 ..... B-13
Tabel B.32 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 1:2 ..... B-14
Tabel B.33 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 2:1 ..... B-14
Tabel B.34 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 0:1 ..... B-14
Tabel B.35 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 1:0 ..... B-15
Tabel B.36 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 40% berat MDEA B-15
Tabel B.37 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 1:1 ..... B-16

Tabel B.38 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 1:2 ..... B-16
Tabel B.39 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 2:1 ..... B-17
Tabel B.40 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 0:1 ..... B-17
Tabel B.41 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 1:0 ..... B-17
Tabel B.42 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 1:1 ..... B-18
Tabel B.43 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 1:2 ..... B-18
Tabel B.44 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 2:1 ..... B-18
Tabel B.45 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 0:1 ..... B-19
Tabel B.46 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 1:0 ..... B-19
Tabel B.47 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 40% berat MDEA B-19
Tabel B.48 Hasil Perhitungan k_{MDEA} dan $k_{[OH-]}$ pada Temperatur 303.15-323.15 K B-20
Tabel B.49 Hasil Perhitungan $k_{apperence}$ konsentrasi 2% berat promotor pada Temperatur 303.15 - 323.15 K ... B-20

Tabel B.50 Hasil Perhitungan $k_{apperence}$ konsentrasi 4% berat promotor pada Temperatur 303.15 - 323.15 K ... B-21
Tabel B.51 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 2% berat promotor komposisi 1:1 pada Temperatur 303.15 - 323.15 K ... B-22
Tabel B.52 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 2% berat promotor komposisi 1:2 pada Temperatur 303.15 - 323.15 K ... B-23
Tabel B.53 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 2% berat promotor komposisi 2:1 pada Temperatur 303.15 - 323.15 K ... B-23
Tabel B.54 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 2% berat promotor komposisi 0:1 pada Temperatur 303.15 - 323.15 K ... B-23
Tabel B.55 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 2% berat promotor komposisi 1:0 pada Temperatur 303.15 - 323.15 K ... B-24
Tabel B.56 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 4% berat promotor komposisi 1:1 pada Temperatur 303.15 - 323.15 K ... B-24
Tabel B.57 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 4% berat promotor komposisi 1:2 pada Temperatur 303.15 - 323.15 K ... B-24
Tabel B.58 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 4% berat promotor komposisi 2:1 pada Temperatur 303.15 - 323.15 K ... B-25
Tabel B.59 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 4% berat promotor komposisi 0:1 pada Temperatur 303.15 - 323.15 K ... B-25
Tabel B.60 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 4% berat promotor komposisi 1:0 pada Temperatur 303.15 - 323.15 K ... B-25
Tabel B.61 Hasil Perhitungan Rezim 40% berat MDEA pada Temperatur 303.15 -323.15 K ... B-26

Tabel C.1 Data Mol Gas Terabsorb untuk Konsentrasi 2% berat Promotor pada Suhu 303.15-333.15 K (kmol/det). C-1
Tabel C.2 Data Mol Gas Terabsorb untuk Konsentrasi 4% berat Promotor pada Suhu 303.15-333.15 K (kmol/det). C-1
Tabel C.3 Data Mol Gas Terabsorb untuk MDEA pada suhu 303.15 - 333.15 K C-1
Tabel C.4 %Recovery CO_2 untuk Konsentrasi 2% berat promotor pada suhu 303.15 - 333.15 K C-2
Tabel C.5 %Recovery CO_2 untuk Konsentrasi 4% berat promotor pada suhu 303.15 - 333.15 K C-2
Tabel C.6 %Recovery CO_2 untuk MDEA pada suhu 303.15 - 333.15 K C-2

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

BAB I
PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Proses absorpsi gas ke dalam liquida seringkali dijumpai di dalam dunia industri, seperti dalam industri gas alam, *petroleum chemical plants*, dan industri amoniak. Tujuan dari penerapan absorpsi dalam industri adalah untuk mengambil suatu komponen dari campuran gas atau untuk menghasilkan suatu produk reaksi, salah satu komponen yang seringkali dipisahkan adalah gas karbon dioksida (CO_2).

Keberadaan gas CO_2 dalam industri petrokimia dan industri pengolahan gas sangat tidak diharapkan. Karena gas CO_2 merupakan gas asam (*acid gas*) yang bersifat korosif sehingga dapat merusak bagian perpipaan dan utilitas pabrik. Sifat korosif CO_2 akan muncul pada daerah dimana terdapat penurunan temperatur dan tekanan, seperti pada bagian *elbow* pipa, *tubing*, *cooler*, dan injektor turbin. Selain itu, gas CO_2 juga dapat mengurangi nilai kalor dari gas alam. Dimana dalam fasilitas turbin, CO_2 akan mengakibatkan penurunan nilai kalor panas akibat CO_2 dan H_2O merupakan produk dari pembakaran. Pada LNG *(Liquified Natural Gas)*, gas CO_2 harus dihilangkan, karena dapat membeku pada temperatur rendah yang mengakibatkan penyumbatan pada sistem perpipaan dan tubing pada *heat exchanger*. Pada industri amoniak, CO_2 merupakan racun pada katalis sintesa amoniak, oleh karena itu CO_2 harus dipisahkan sebelum memasuki unit sintesa amoniak (Tan, 2012).

Melihat besarnya kerugian yang dapat ditimbulkan oleh gas CO_2, maka penting dilakukan proses pemisahan gas CO_2 dari aliran gas. Rao dan Rubin (2002), mengemukakan ada beberapa teknologi untuk memisahkan dan menangkap CO_2, seperti: proses absorpsi secara fisik dan kimia, proses adsorpsi, proses *cryogenic* (pendinginan), teknologi membran, dan menggunakan sistem alga atau mikroba. Teknologi pemisahan CO_2 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. Penggunaan pelarut kimia dimaksudkan untuk meningkatkan pelarut dalam menyerap gas CO_2. Beberapa jenis pelarut yang sering digunakan adalah ammonia, kalium karbonat (K_2CO_3) dan senyawa *alkanolamine* seperti *Monoethanolamine* (MEA), *Diethanolamine* (DEA), *Diisopropanolamine* (DIPA), *Diglycolamine* (DGA), *Triethanolamine* (TEA), *Methyldiethanolamine* (MDEA) dan 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP).

Masing-masing solvent tersebut juga masih memiliki kekurangan. Ammonia memiliki kekurangan yaitu membutuhkan suhu absorber kurang dari 60^oC untuk mencegah terbentuk *ammonium bicarbonate* dan mempunyai votalitas yang tinggi sehingga mudah menguap (Olajire, A.A., 2010). Sedangkan K_2CO_3 korosif terhadap *carbon steel* dan membutuhkan promotor senyawa amine seperti *piperazine* atau pelarut dengan temperatur tinggi (lebih dari 75^oC) untuk meningkatkan laju perpindahan massa CO_2 (Faiz, R. Dkk., 2011). DIPA memiliki kekurangan yaitu mempunyai kecepatan reaksi yang sedang terhadap CO_2 (Aroonwilas dkk., 2004). AMP memiliki daya absorpsi yang kurang dibandingkan dengan MEA (Abhodeir dkk., 2006). Sedangkan MEA memiliki kekurangan pada daya muat CO_2 yang terbatas, mudah terdegradasi melalui reaksi irreversible oleh CO_2 dan O_2, dan memiliki banyak permasalahan pada operasionalnya seperti foaming, fouling, bertambahnya viskositas serta korosi pada alat. DEA memiliki kekurangan pada daya muat CO_2 yang terbatas dan rentan terhadap korosi dan degradasi. Sedangkan MDEA hanya memiliki kekurangan yaitu rendahnya kinetika absorpsi terhadap CO_2 (Tan dkk., 2012). Selain itu, MDEA memiliki banyak keuntungan, diantaranya adalah memiliki muatan CO_2 yang besar di dalam MDEA dibandingkan dengan MEA dan DEA dengan pengikatan CO_2 menjadi karbonat (Barzagli dkk., 2010), panas

yang dibutuhkan untuk reaksi dengan gas asam rendah sehingga membutuhkan energi yang rendah pada regenerasinya (Dave dkk., 2009), degradasi larutan yang rendah dibandingkan MEA dan DEA (Aroonwilas dkk., 2004) dan tidak korosif terhadap baja karbon (Bishnoi dkk., 2000).

Kekurangan yang ada pada MDEA dapat di rekayasa dengan menambahkan promotor pada larutan MDEA itu sendiri. Penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan Sema dkk. (2012), mempelajari bahwa MDEA yang diberi promotor MEA dapat meningkatkan kinetika reaksinya dengan campuran MDEA-MEA optimum sebesar 23-7 (% berat). Benamor dkk. (2015), dalam percobaannya menyimpulkan bahwa glisin dapat menjadi promotor tingkat yang sangat baik untuk reaksi antara CO_2 dan *alkanolamine*. Fang dkk. (2014), mempelajari bahwa campuran MEA dengan satu jenis asam amino (proline, sarkosine, glisin, alanin, teonin) dapat meningkatkan kinetika reaksi absorpsi yang ditandai dengan meningkatkan total tekanan pada alat yang digunakan. Idem dkk (2010) mempelajari bahwa *piperazine* dapat digunakan menjadi promotor efektif dalam larutan MEA, MDEA atau potassium karbonat karena dapat membentuk ikatan terhadap CO_2 dengan cepat untuk membentuk karbamat. Shen dkk (2013) menemukan bahwa *arginine* dapat digunakan sebagai promotor yang efektif ketika ditambahkan sejumlah kecil *arginine* kedalam 35% larutan potassium karbonat. Namun *piperazine* dan *arginine* sulit untuk didapatkan karena harus mengimpor dan harganya juga lebih mahal dari promotor lain.

Penelitian yang dilakukan oleh Smith dkk. (2014) yaitu mengenai absorpsi gas CO_2 dalam larutan K_2CO_3 dengan menambahkan promotor *Glycine* dan dilakukan di sebuah pabrik percontohan skala laboratorium. Hasil penelitian ini menunjukan bahwa penambahan 10% berat *Glycine* dapat meningkatkan laju *recovery* CO_2 hingga 6 kali bila dibandingkan dengan kondisi serupa tanpa promotor. Pada penelitian yang dilakukan oleh Guoping Hu dkk. (2016) menunjukan beberapa promotor memiliki kinerja yang meningkat sesuai urutan

sarcosine>proline>glycine>boric acid. Namun, hanya *potassium glycinate* and *boric acid* yang telah diuji di dalam pabrik percontohan absorbsi pelarut sebagai promotor pelarut *potassium carbonate* sampai saat ini. *Potassium glycinate* menunjukkan kinerja yang baik dalam penelitian skala pabrik percontohan ini, sementara *boric acid* tidak memberikan peningkatan pada laju reaksi saat dioperasikan di pabrik percontohan. Dari segi harga, *Glycine* memiliki harga yang lebih ekonomis dibandingkan promotor lainnya. sementara salah satu asam amino yaitu *L-Glutamic Acid* juga memiliki harga yang ekonomis namun memiliki harga kinetika yang rendah dibandingkan *Glycine*. Penelitian menggunakan kombinasi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* yang diharapkan mampu menjadi alternatif promotor campuran yang lebih ekonomis dengan harga kinetika yang diharapkan.

I.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, dapat dirumuskan suatu masalah yaitu perlunya penambahan promotor pada absorben MDEA untuk dapat meningkatkan kecepatan reaksinya terhadap CO_2. Asam amino terbukti dapat meningkatkan kecepatan reaksi terhadap CO_2 jika ditambahkan sebagai promotor. Sehingga perlu dipelajari efek penambahan campuran dua macam asam amino terhadap kecepatan reaksi absorpsi CO_2 oleh MDEA. Asam amino yang akan digunakan pada percobaan ini adalah *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* dengan komposisi dan kondisi operasi tertentu.

I.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Proses pemisahan CO_2 dilakukan dengan menggunakan campuran gas sintetis (CO_2 dan nitrogen sintetis) dan N_2 sebagai gas inert.
2. Beberapa properti thermodinamika, parameter fisik seperti kelarutan CO_2 dalam *solvent* dan data-data kimia-fisika *solvent* yang digunakan diperoleh dari hasil studi literatur sebelumnya.

I.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memperoleh data kinetika reaksi absorpsi MDEA dengan kombinasi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* (MDEA-*glycine*, MDEA-*L-Glutamic Acid*, MDEA-*glycine-L-Glutamic Acid*).
2. Membandingkan kereaktifan absorpsi CO_2 untuk sistem larutan MDEA berpromotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* yang diperoleh dari percobaan ini dengan larutan MDEA berpromotor yang diperoleh dari literatur.

I.5 Manfaat Penelitian

Manfaat Penelitian ini adalah didapatkan informasi mengenai data kinetika reaksi dari absorben MDEA berpromotor campuran *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* pada variabel komposisi campuran tertentu sebagai upaya untuk optimalisasi proses pemisahan CO_2 di dunia industri.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Karbon Dioksida (CO_2)

Karbon dioksida (CO_2) 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. Gas CO_2 terdapat di atmosfer dalam jumlah kecil yaitu sekitar 370 ppmv. Dalam jumlah yang tidak besar ini, gas CO_2 memainkan peran yang sangat penting dalam kehidupan di bumi. Gas CO_2 merupakan gas yang tidak berbau dan berwarna. Gas CO_2 termasuk oksida asam dan tidak berbentuk cair pada tekanan dibawah 5.1 atm tetapi berbentuk padat pada temperatur di bawah -78^0C. Dalam bentuk padat, CO_2 disebut *dry ice*. Pada temperatur diatas $31{,}1^0$C (pada kondisi diatas 73,9 bar yang merupakan tekanan pada titik kritis), CO_2 dikatakan berada pada kondisi superkritis dimana CO_2 tersebut akan berlaku sebagai gas walaupun pada tekanan yang sangat tinggi. Densitas dari gas tersebut akan sangat besar mencapai atau bahkan melebihi densitas dari air dalam fasa cair.

Tabel II. 1 Karakteristik Fisik CO_2

Karakteristik Fisik	Nilai	Satuan
Berat Molekul	44,01	
Temperatur kritis	31,1	^{0}C
Tekanan kritis	73,9	bar
Densitas kritis	467	kg/m^3

Tabel II. 1 Karakteristik Fisik CO_2 (*continued*)

Titik Didih (1,103 bar)	**-78,5**	**^{0}C**
Fasa Gas:		
Densitas gas (1,013 bar, titik didih)	2,814	kg/m^3
Densitas Gas (STP)	1,976	kg/m^3
Kelarutan di air (STP)	1,716	vol/vol
Fasa Cair:		
Tekanan Uap (20^{0}C)	58,5	bar
Densitas Cair (-20^{0}C, 19,7 bar)	1032	kg/m^3
Fasa Padat:		
Densitas pada titik beku air	1562	kg/m^3

Sumber: *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, 2000

Gas CO_2 dalam udara murni berjumlah 0,03%, bila melebihi toleransi dapat mengganggu pernapasan. Selain itu, gas CO_2 yang terlalu berlebihan di bumi dapat mengikat panas matahari sehingga suhu bumi panas. Pemanasan global di bumi akibat CO_2 disebut juga sebagai efek rumah kaca. Pemanasan global sudah lama menjadi perbincangan, namun belum juga ada

cara yang efektif untuk menghilangkannya atau setidaknya untuk menguranginya.

Gas CO_2 di produksi hampir 97% dari hasil pembakaran bahan bakar fosil, seperti dari sumber batu bara, minyak, gas alam, dan biomassa. Keberadaan CO_2 pada industri gas alam dapat menurunkan nilai *heating value* pada gas dan komponen asam dapat menyebabkan korosi pada peralatan. Pada pipa gas alam, kandungan CO_2 yang diizinkan sekitar 1-2% mol (Buckingham, 1964; Ma'mun, 2005).

Adanya CO_2 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 CO_2 . Gas CO_2 yang keluar meninggalkan kolom harus memenuhi spesifikasi batas gas CO_2 (**Tabel II.2**).

Tabel II. 2 Spesifikasi batas konsentrasi gas CO_2 dalam proses industri

Proses	**Batas konsentrasi gas CO_2**
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)

Untuk mempertahankan atmosfer bersih, beberapa cara untuk mengurangi gas CO_2 yakni, melakukan konservasi dan efisien pada semua unit pabrik, Memanfaatkan gas CO_2 yang tersisa misalnya untuk refrigerasi, *dry ice*, dan mereduksi gas CO_2 menjadi produk yang lebih bermanfaat, contohnya methanol.

II.2 Teknologi Pemisahan CO_2

Ada beberapa cara untuk pemisahan CO_2 yang umum digunakan yakni, pemisahan CO_2 menggunakan membran, dengan metode adsorpsi, distilasi kriogenik, dan teknologi absorpsi. Pemisahan CO_2 menggunakan membran menggunakan prinsip perbedaan permaebilitas antara CO_2 dengan gas yang lain. Sehingga jika campuran gas yang mengandung CO_2 dilewatkan pada membran, maka CO_2 akan lebih cepat lolos melewati membran dan gas yang bersih dari CO_2 akan keluar sebagai produk. Namun teknologi ini mempunyai beberapa kelemahan, yaitu selektivitasnya yang buruk dan penurunan tekanan yang sangat besar. Selektivitas dari membran yang buruk menyebabkan banyak hidrokarbon yang hilang ikut terlewatkan bersama-sama dengan CO_2.

Pemisahan CO_2 dengan adsorpsi menggunakan prinsip penyerapan CO_2 pada permukaan adsorben melibatkan reaksi kimia. Adsorben yang sering digunakan dalam proses ini adalah *Iron Sponge*, *Zinc Oxide*, dan *Molecular Sieve*. Kelebihan dari metode ini adalah cukup baik menangkap H_2S tetapi kurang baik untuk adsorpsi CO_2, Karena efektivitasnya yang buruk. Selain itu, regenarasi dari adsorben ini relatif sulit dan membutuhkan suhu yang tinggi.

Distilasi kriogenik adalah distilasi pada suhu yang sangat rendah (mencapai -180^0C). Distilasi kriogenik ini membutuhkan persiapan awal *feed* yang rumit, instalasi unit yang sangat mahal dan kompresi yang dibutuhkan menyebabkan operasi kompresor besar yang membutuhkan biaya tinggi. Pemisahan CO_2 dengan absorpsi adalah metode yang paling sering dijumpai. Absorpsi

lebih disukai dalam industri pengolahan gas dibanding teknologi lain karena memiliki efektivitas tinggi, kualitas produk yang baik, dan relatif mudah serta murah jika melihat efektivitasnya. Teknologi absorpsi prinsipnya adalah melarutkan CO_2 dalam pelarut yang sesuai. Perbedaan kelarutan antara gas lain dan CO_2 dalam absorben menyebabkan produk keluaran akan bersih dari CO_2. Untuk dapat mengabsorb CO_2 maka absorben dikontakkan dengan gas mengandung CO_2. Ada beberapa pegontakkan CO_2 dengan pelarut, diantaranya adalah dengan kontaktor kolom dan kontaktor membran. Kontaktor kolom berbentuk seperti kolom tinggi yang didalamnya berisi media pengontak seperti tray atau packing. Gas yang mengandung CO_2 akan masuk dari bagian bawah kolom absorber dan solven dimasukkan dari atas, sehingga terjadi kontak secara *countercurrent* dan CO_2 akan lurut dalam absorben (Antonius, 2012).

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 konsentrasinya berubah sebagai hasil dari reaksi kimia.

Absorpsi disertai dengan reaksi kimia telah mendapatkan perhatian yang serius dalam proses industri kimia. Proses absorpsi reaktif (*Reactive Absorption Processes/ RAP)* adalah proses yang menggabungkan mekanisme reaksi kimia 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 energi, air, dan pelarut 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 tidak 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 realistis tapi kompleks.

II.3 Pemilihan Pelarut dan Promotor

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

- Jika tujuan utama adalah untuk menghasilkan larutan yang spesifik, maka pelarut ditentukan berdasarkan sifat dari produk
- 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, korosivitas, harga, ketersediaan, viskositas, dan lain sebagainya.

Pelarut yang paling banyak digunakan pada proses absorpsi CO_2 adalah *alkanolamine*, dimana terbuat dengan menggantikan satu, dua atau tiga atom hidrogen pada dengan molekul ammonia untuk membentuk amina primer, sekunder, dan tertier. Karena senyawa amina dapat bereaksi dengan CO_2 membentuk senyawa kompleks (ion karbonat) dengan ikatan kimia yang lemah. Ikatan kimia ini mudah terputus dengan pemanasan sehingga regenerasi absorben dapat dengan mudah terjadi (Wang et.al, 2003). Selain senyawa alkanolamine, pelarut yang dapat digunakan pada proses absorpsi CO_2 adalah air dan NaOH. Namun, senyawa tersebut tidak lebih efektif daripada senyawa amina dalam menyerap CO_2. Pelarut kimia yang lainnya adalah K_2CO_3 yang digunakan untuk menghilangkan H_2S dan CO_2 pada gas. Tetapi pelarut ini tidak diterima secara massal oleh industri (Servatius, 2012).

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 *Methyldiethanolamine* (MDEA) (Wang dkk, 2011; Yildirim dkk, 2012). Pelarut ini dapat digunakan sebagai pelarut tunggal maupun campuran. Untuk sifat-sifat masing-masing tipe alkanolamine dapat dilihat pada **Tabel II.3** dan untuk perbandingan masing-masing tipe alkanolamine dapat dilihat pada **Tabel II.4**

Tabel II. 3 Sifat-sifat Fisik MEA, DEA, dan MDEA

Sifat Fisik	MEA	DEA	MDEA
Tekanan Uap, Pa (20^0C)	25	0,01	1
Massa Jenis (kg/m^3)	1012	1090	1043
Normal Boiling Point (^{0}C)	171	269	247

Sumber: Huntsman, 2007; Frauenkron, 2002

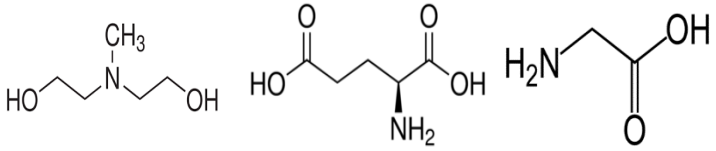
Tabel II. 4 Perbandingan MEA, DEA, dan MDEA

Keterangan	MEA	DEA	MDEA
Harga	Paling Ekonomis	Tidak terlalu mahal	Paling mahal diantara MEA dan DEA
Sifat Korosif	Paling Korosif diantara DEA dan MDEA	Korosif	Tidak Korosif
Penyerapan terhadap CO_2	Kurang efektif dalam menyerap CO_2 diantara DEA dan MDEA	Paling Efektif dalam menyerap CO_2	Reaksi dengan CO_2 berjalan lambat sehingga kurang efektif

Penelitian ini menggunakan larutan MDEA dengan promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid*. Larutan MDEA berfungsi sebagai reagen dalam reaksi absorpsi. Larutan MDEA digunakan karena memiliki beberapa keuntungan yaitu energi yang dibutuhkan kecil, kapasitas penyerapan besar, stabilitas yang tinggi dan kelarutan yang jauh lebih besar daripada air dalam menyerap CO_2.

Larutan MDEA juga memiliki kekurangan yaitu kecepatan reaksi yang rendah. Maka dari itu digunakan *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* sebagai promotor. Penggunaan promotor ini dapat menaikkan laju reaksi tanpa menghilangkan keuntungan dari penggunaan larutan MDEA itu sendiri.

L-Glutamic Acid adalah asam α-amino dengan rantai samping karboksilat. *L-Glutamic Acid* adalah asam amino *non-essensial* yang sangat dibutuhkan oleh tubuh. *Glycine* adalah suatu asam amino yang paling sederhana. *Glycine* tidak memiliki rantai samping sehingga tidak mengandung satu karbon kiral. Asam amino lain memiliki rantai samping, sehingga karbon α tersebut bersifat kiral. Amino grup primer (*Glycine*) dan amina tersier (MDEA) diprediksi dapat bereaksi dengan CO_2 dengan cara yang sama. Berikut adalah struktur kimia dari MDEA ($CH_3N(C_2H_4OH)_2$), *L-Glutamic Acid* ($C_5H_9NO_4$) dan *Glycine* ($C_2H_5NO_2$)



(a) (b) (c)

Gambar II. 1 Struktur kimia (a) MDEA, (b) *L-Glutamic Acid*, dan (c) *Glycine*

Reaksi antara MDEA dan CO_2 dapat ditulis sebagai berikut (Teerawat Sema, 2012):

$$MDEA + CO_2 + H_2O \leftrightarrow MDEAH^+ + HCO_3 \quad (2.1)$$

$$H_2O + CO_2 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^- \quad (2.2)$$

$$CO_2 + OH^- \leftrightarrow HCO_3^- \quad (2.3)$$

$$HCO_3^- \leftrightarrow H^+ + CO_3^{2-} \quad (2.4)$$

$$H_2O \leftrightarrow H^+ + OH^- \quad (2.5)$$

Asam amino terbagi menjadi tiga keadaan fisik yakni asam, *zwitterionic* dan basis atau deprotonasi. Untuk keadaan asam dan *zwitterionic* asam amino kurang reaktif terhadap CO_2 dari pada

keadaan deprotonasi. Asam amino yang terlarut dalam air berada dalam keadaan *zwitterionic* dengan amino yang terprotonasi. Deprotonasi asam amino dapat dilakukan dengan menambahkan basa kuat sesuai dengan jumlah equimolarnya. Basa yang digunakan umumnya KOH dimana berdisosiasi penuh terhadap air. Adapun deprotonasi dari *zwitterion* asam amino dapat ditulis sebagai berikut (Hendy Thee, 2013):

$$^{+}NH_2R_1R_2COO^{-} + OH^{-} \leftrightarrow NHR_1R_2COO^{-} + H_2O \qquad (2.6)$$

Beberapa peneliti (Holst dkk, 2009; Vaidya dkk, 2010; Kim dkk, 2012; Paul dan Thomsen, 2012; Kumar dkk, 2003; Jing dkk, 2012) menunjukkan reaksi antara CO_2 dan asam amino yang telah diprotonasi.

$$CO_2 + H_2N\text{-}CHR'\text{-}COO^{-}K^{+} \underset{k_{-1}}{\overset{k_2}{\rightleftharpoons}} {}^{-}COO^{+}H_2N\text{-}CHR'\text{-}COO^{-}K^{+} \qquad (2.7)$$

Reaksi ini diikuti dengan penghilangan proton oleh suatu basa, B. Pada system ini seperti $KR'NH_2$, OH^-, H_2O, dan asam amino yang telah diprotonasi.

$$^{-}COO^{+}H_2N\text{-}CHR'\text{-}COO^{-}K^{+} + B \rightarrow {}^{-}COOHN\text{-}CHR'\text{-}\,COO^{-}K^{+} + BH^{+} \qquad (2.8)$$

II.4 Kinetika Reaksi Absorpsi CO_2

Ketika CO_2 terserap dalam larutan MDEA (R_3N) maka akan terjadi reaksi stoikiometri sebagai berikut (Haimour dan Sandall, 1984).

$$CO_2 + H_2O + R_3N \rightleftharpoons R_3NH^{+} + HCO_3^{-} \qquad (2.9)$$

Di dalam larutan terjadi reaksi-reaksi kesetimbangan sebagai berikut :

$$H_2O \overset{K_W}{\leftrightarrow} H^{+} + OH^{-} \qquad (2.10)$$

$$CO_2 + H_2O \overset{K_1}{\leftrightarrow} HCO_3^{-} + H^{+} \qquad (2.11)$$

$$HCO_3^{-} \overset{K_2}{\leftrightarrow} CO_3^{2-} + H^{+} \qquad (2.12)$$

$$CO_2 + H_2O + R_3N \overset{K_3}{\leftrightarrow} R_3NH^{+} + HCO_3^{-} \qquad (2.13)$$

$$R_3N + H^{+} \overset{K_4}{\leftrightarrow} R_3NH^{+} \qquad (2.14)$$

Dimana,

$K_w = [H^+][OH^-]$ $K_1 = \frac{[HCO_3^-][H^+]}{[CO_2]}$; $K_2 = \frac{[CO_3^{2-}][H^+]}{[HCO_3^-]}$; $K_3 = \frac{[R_3NH^+][HCO_3^-]}{[CO_2][R_3N]}$; dan $K_4 = \frac{[R_3NH^+]}{[R_3N][H^+]}$

Dari reaksi kesetimbangan diatas, dapat ditentukan nilai [OH$^-$] dan $[CO_2]_e$ sebagai berikut (Yi dkk, 2009):

$$[OH^-] = \frac{K_W}{K_2}\frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} \quad (2.15)$$

$$[CO_2]_e = \frac{K_2K_4}{K_3}\frac{[HCO_3^-]^2}{[CO_3^{2-}]} \quad (2.16)$$

Nilai K_w, K_1, K_2, K_3, dan K_4 didapat dari persamaan berikut :

$$K_w = \exp\left(140{,}932 - \frac{13445{,}9}{T} - 22{,}4773\right) \quad (2.17)$$

$$K_1 = \exp(235{,}482 - \frac{12092{,}1}{T} 36{,}7816 \ln T) \quad (2.18)$$

$$K_2 = \exp\left(220{,}067 - \frac{12431{,}7}{T} - 35{,}4819\right) \quad (2.19)$$

(Guo-Wen Xu, 1998; Edwards, 1978)

$$K_4 = \frac{1}{10^{(-14{,}01+0{,}0184\,T)}} \quad (2.20)$$

(Guo-Wen Xu dkk, 1998; Barth, 1984)

Tidak semua konstanta kesetimbangan *independent*, pada kasus ini konstanta kesetimbangan yang *independent* hanyalah *Kw*, *K1*, *K2*, dan *K4*. Adapun konstanta kesetimbangan *K3* dapat diperoleh dengan persamaan:

$$K_3 = K_1 \times K_4 \quad (2.21)$$

Langkah – langkah reaksi yang menentukan laju reaksi untuk reaksi (2.9) adalah :

$$CO_2 + H_2O \overset{k_{H_2O}}{\longleftrightarrow} HCO_3^- + H^+ \quad (2.22)$$

$$CO_2 + OH^- \overset{k_{OH^-}}{\longleftrightarrow} HCO_3^- \quad (2.23)$$

Pada larutan yang memiliki pH > 8, reaksi (2.22) dapat diabaikan, dan reaksi (2.23) yang lebih dominan dan sebagai laju reaksi pembatas (*rate limiting reaction*). Sehingga persamaan laju reaksinya adalah :

$$r_{CO_2-OH^-} = k_{OH^-}[OH^-][CO_2] \quad (2.24)$$

$$\log_{10} k_{OH^-} = 13{,}635 - \frac{2895}{T\,(K)} \quad (2.25)$$

(Danckwerts, 1970)

Dapat diketahui dari penelitian yang telah dilakukan oleh Hendy Thee dkk, reaksi antara CO_2 dan asam amino adalah sebagai berikut :

$$CO_2 + H_2N\text{-}CHR'\text{-}COO^-K^+ \underset{k_{-1}}{\overset{k_2}{\rightleftharpoons}} {}^-COO^+H_2N\text{-}CHR'\text{-}COO^-K^+ \quad (2.26)$$

$${}^-COO^+H_2N\text{-}CHR'\text{-}COO^-K^+ + B \rightarrow {}^-COOHN\text{-}CHR'\text{-}COO^-K^+ + BH^+ \quad (2.27)$$

Dapat diketahui dari penelitian sebelumnya (Ko dan Li, 2000; Pawlak, 2011) bahwa nilai k_{MDEA} sebesar:

$$CO_2 + H_2O + R_3N \overset{k_{MDEA}}{\longleftrightarrow} R_3NH^+ + HCO_3^- \quad (2.28)$$

$$k_{MDEA} = 4{,}01 \times 10^8 \exp\left(\frac{-5400}{T}\right)$$

Persamaan laju reaksi *overall* (r_{ov}) daat didefinisikan sebagai berikut (Shen dkk, 2013):

$$r_{ov} = k_{ov}\,[CO_2] \quad (2.29)$$

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

$$k_{ov} = k_{OH^-}\,[OH^-] + k_{app}\,[\text{promotor}] + k_{MDEA}\,[\text{MDEA}] \quad (2.30)$$

Maka, dapat didefinisikan pula bahwa :

$$k_{app} = k_{ov} - k_{OH^-}\,[OH^-] - k_{MDEA}\,[\text{MDEA}] \quad (2.31)$$

Kondisi reaksi pada absorpsi CO_2 dalam larutan MDEA berpromotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai bilangan Hatta adalah $3 < Ha < \frac{1}{2}\,Ei$, dimana (Lin dan Shyu, 2009):

$$Ha = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L} \quad (2.32)$$

Untuk $Ha > 3$, laju absorpsi CO_2 adalah (Danckwerts, 1970; Lin dan Shyu, 1999) :

$$\bar{R} = ([CO_2]_i - [CO_2]_e)\sqrt{D_{AL}k_{ov}} \quad (2.33)$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{[R_3\mathrm{N}]}{z\,[CO_2]_i}\sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad (2.34)$$

II.5 Absorpsi CO_2 dalam WWC

WWC 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 II.2**. 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, 2008).

$$U(x) = \frac{3}{2}\left(\frac{v}{\pi d}\right)^{2/3}\left(\frac{g\rho}{3\mu}\right)^{1/3}\left(1 - x^2\left[\frac{\pi g d \rho}{3\mu v}\right]^{2/3}\right) \quad (2.35)$$

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

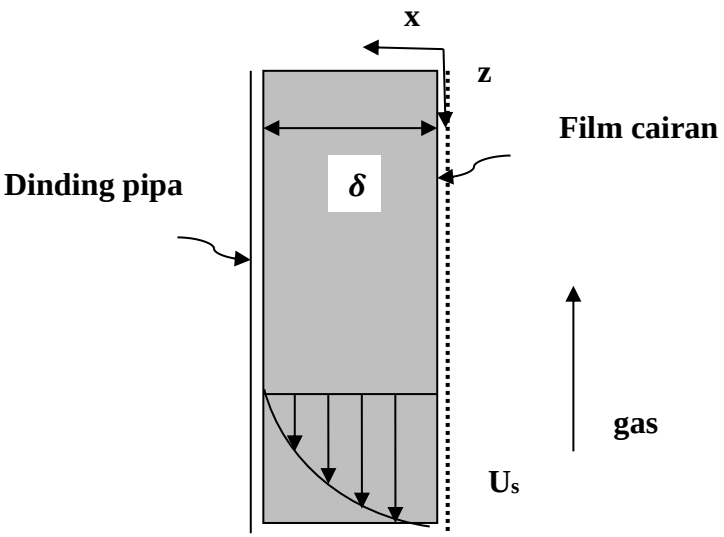
Kecepatan U adalah 0 pada permukaan dinding pipa, dimana $x = \delta$ (δ = tebal *film*), maka $\delta = \left[\frac{3\mu v}{\pi g d \rho}\right]^{1/3}$ (2.36)

Sehingga persamaan (2.35) dapat ditulis:

$$U = U_s\,(1 - x^2 / \delta^2) \quad (2.37)$$

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

$$U_s = \frac{3}{2}\left(\frac{v}{\pi d}\right)^{2/3}\left(\frac{g\rho}{3\mu}\right)^{1/3} \quad (2.38)$$



Gambar II. 2 *Distribusi kecepatan* Wetted Wall Colum *(WWC*

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

$$t = \frac{h}{U_s} = \frac{2h}{3}\left[\frac{3\mu}{g\rho}\right]^{1/3}\left[\frac{\pi d}{v}\right]^{2/3} \qquad (2.39)$$

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 :

$$\frac{Q_{(t)}}{t} = \frac{q}{\pi d h} \qquad (2.40)$$

Laju absorpsi (*q*) dapat dihitung secara eksperimen, dan *Q*(*t*) dihitung dari persamaan (2.40), *t* dihitung dari persamaan (2.35) dan dapat diubah – ubah dengan merubah laju alir (*v*) atau tinggi kolom (*h*). Jadi *Q*(*t*) dapat ditentukan sebagai fungsi waktu (*t*) (Altway, 2008).

II.6 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu mengenai studi kinetika absorpsi reaktif yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk referensi, seperti yang telah tercantum dalam **Tabel II.5** berikut :

Tabel II. 5 Persamaan Konstanta Kecepatan Reaksi untuk Berbagai Sistem dari Peneliti Terdahulu

No	Tahun	Nama Peneliti	Senyawa	k_2 ($M^{-1}s^{-1}$)
1	2017	Mahmud et. al.	Glisin	$3{,}29 \times 10^{13} \exp(-8143{,}7/T)$
2	2014	Thee et. al.	Glisin (Sistem K_2CO_3 + Glisin)	$1{,}22 \times 10^{12} \exp(-5434/T)$
3	2016	Benamor et. al.	Glisin	$2{,}4 \times 10^{7} \exp(-3887/T)$
4	2017	Amrin et. al.	Glisin (Sistem Glisin + MDEA)	$5{,}21 \times 10^{16} \exp(-9169{,}9/T)$
5	2016	Elhosane et al.	Glisin (Sistem Glisin + MDEA)	$8{,}11 \times 10^{18} \exp(-5137.6/T)$
6	2015	Pudjiastuti et al.	Glisin (Sistem Glisin + DEA)	$1.419 \times 10^{12} \exp(-3634/T)$
7	2017	Mahmud et. al.	Sarcosine	$3{,}9 \times 10^{13} \exp(-7991/T)$
8	2012	Xiang et. al.	Sarcosine	$9{,}45 \times 10^{14} \exp(-7337/T)$
9	2014	Thee et. al.	Sarcosine (Sistem K_2CO_3 + Sarcosine)	$6{,}24 \times 10^{10} \exp(-1699/T)$
10	2017	Mahmud et. al.	Arginin	$2{,}81 \times 10^{10} \exp(-4482{,}9/T)$

Tabel II. 5 Persamaan Konstanta Kecepatan Reaksi untuk Berbagai Sistem dari Peneliti Terdahulu *(continued)*

No	Tahun	Nama Peneliti	Senyawa	k_2 ($M^{-1}s^{-1}$)
11	2013	Shen et. al.	Arginin (Sistem K_2CO_3 + Arginin)	$2{,}58 \times 10^{16} \exp(-8645/T)$
12	2017	Sitorus et al.	Arginin (Sistem Arginin + MDEA)	$1{,}91 \times 10^{25} \exp(-12296/T)$
13	2017	Haikal et. al.	Arginin (Sistem Arginin + *L-Glutamic Acid* + MDEA)	$5{,}86 \times 10^{15} \exp(-7752{,}8/T)$
14	2017	Haikal et. al.	*L-Glutamic Acid* (Sistem Arginin + *L-Glutamic Acid* + MDEA	$6{,}72 \times 10^{14} \exp(-7091{,}2/T)$
15	2017	Haikal et. al.	*L-Glutamic Acid* (Sistem *L-Glutamic Acid* + MDEA)	$1{,}09 \times 10^{13} \exp(-5877{,}5/T)$
16	2017	Haikal et. al.	Arginin (Sistem Arginin + MDEA)	$1{,}73 \times 10^{14} \exp(-6660{,}3/T)$
17	2017	Amrin et. al.	Glisin (Sistem Glisin + MDEA)	$5{,}21 \times 10^{16} \exp(-9169{,}9/T)$
18	2017	Amrin et. al.	Glisin (Sistem Glisin + Arginin + MDEA)	$5{,}71 \times 10^{6} \exp(-2365{,}2/T)$

Tabel II. 2 Persamaan Konstanta Kecepatan Reaksi untuk Berbagai Sistem dari Peneliti Terdahulu *(continued)*

No	Tahun	Nama Peneliti	Senyawa	k_2 ($M^{-1}s^{-1}$)
19	2017	Amrin et. al.	Arginin (Sistem Glisin + Arginin + MDEA)	$9{,}10 \times 10^{13} \exp(-6530{,}5/T)$
20	2014	Thee et. al.	Prolin (Sistem K_2CO_3 + Proline)	$1{,}02 \times 10^{11} \exp(-2168/T)$
21	2017	Donsius et. al.	Piperazine (Sistem MDEA + TEA + Piperazine)	$2{,}67 \times 10^{16} \exp(-8035{,}6/T)$
22	2017	Haikal et. al.	MDEA (Sistem MDEA)	$1{,}15 \times 10^{16} \exp(-9567/T)$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

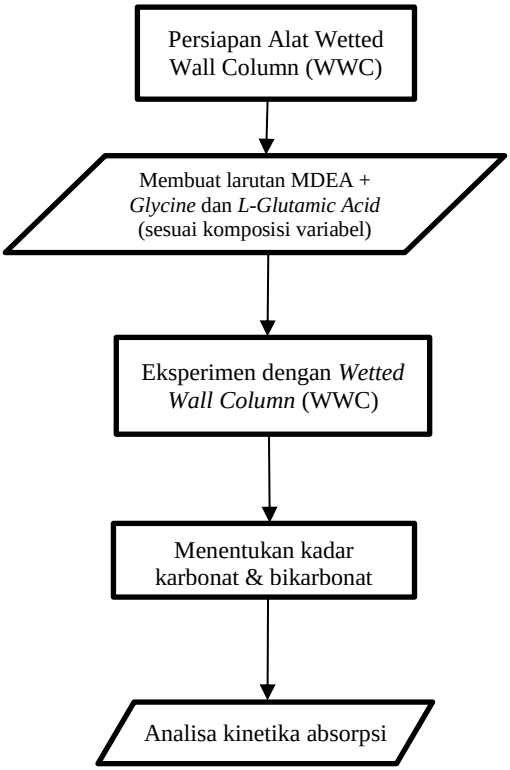
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

BAB III
METODE PENELITIAN

III.1 Deskripsi Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menentukan data kinetika reaksi absorpsi gas karbon dioksida (CO_2) dalam larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) berpromotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* menggunakan peralatan *Wetted Wall Column* (WWC) skala laboratorium pada tekanan atmosfer.



Gambar III. 1 Rancangan Penelitian

III.2 Rancangan Percobaan

III.2.1 Penetapan Variabel

- Variabel Tetap
  1. Tekanan : 1 atmosfer
  2. Gas Umpan : campuran 40% CO_2 + 60% N_2
  3. Laju alir gas umpan : 6 L/menit
  4. Pelarut : Larutan MDEA 40% berat total pelarut
  5. Laju alir pelarut : 200 mL/menit
  6. Jenis promotor : *Glycine* dan *L-Glutamic Acid*

- Variabel Bebas

Variabel bebas pada penelitian ini adalah suhu operasi, kombinasi dan konsentrasi promotor. Variabel bebas yang dimaksud dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

1. Komposisi promotor campuran (*Glycine* dan *L-Glutamic Acid*) dalam larutan yaitu 2% dan 4% berat dari berat total larutan.
2. Rasio perbandingan berat antara *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* dalam % berat promotor yaitu 1:1, 1:2, 2:1, 0:1 dan 1:0.
3. Suhu operasi yang digunakan yaitu 30˚C, 40˚C dan 50˚C.

III.2.2 Analisis Sampel

Analisa konsentrasi awal dan akhir kandungan karbonat dan bikarbonat dilakukan dengan metode *CO_2-analysis* (Karl Anders Hoff, 2003) menggunakan larutan $BaCl_2$ dalam mengikat ion karbonat. Selanjutnya dilarutkan dengan HCl dan titrasi menggunakan NaOH dengan indikator dan *metil orange* (MO).

III.3 Bahan dan Alat yang Digunakan

III.3.1 Bahan yang Digunakan

1. Campuran Gas CO_2 40% *balance* N_2
2. MDEA

   Spesifikasi *Methyldiethanolamine*

Rumus Molekul	:	$C_5H_{13}NO_2$
Berat Molekul	:	119,169 gr/mol

Titik Didih	:	247,3˚C
Kelarutan dalam air	:	100%
Kemurnian	:	99%
Densitas	:	1,038 gr/mol
Fase	:	Liquid

3. *Glycine* (Pro Analisis)
   Spesifikasi *Glycine*

Rumus Molekul	:	$C_2H_5NO_2$
Berat Molekul	:	75,07 gr/mol
Kemurnian	:	99%
Keasaman	:	5,6 Pka
Kelarutan dalam air	:	25 gr/100 mL (25˚C)
Titik leleh	:	233˚C

4. *L-Glutamic Acid* (Pro Analisis)
   Spesifikasi *L-Glutamic Acid*

Rumus Molekul	:	$C_5H_9NO_4$
Berat Molekul	:	147,13 gr/mol
Titik Didih	:	175˚C
Kemurnian	:	99%
Titik Leleh	:	213˚C
Kelarutan Dalam Air	:	8,57 gr/ lt H_2O
Densitas	:	1,46 gr/mol
Keasaman	:	4,07 Pka

5. Indikator *Phenolphtalein* dan *Metil Orange*
   Spesifikasi Metil Orange

Rumus Molekul	:	$C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$
Berat Molekul	:	327,22 gr/mol
Densitas	:	1,28 gr/mol
Kelarutan Dalam Air	:	0,5 gr / 100 mL

Spesifikasi Phenolphthalein

Rumus Molekul	:	$C_{20}H_{14}O_4$
Densitas	:	1,277 gr/mol
Titik Leleh	:	258-263˚C
Kelarutan Dalam Air	:	400 mg/lt

6. KOH (*Extra pure*)

Spesifikasi Kalium Hidroksida

Rumus Molekul	:	KOH
Berat Molekul	:	56,11 gr/mol
Densitas	:	2,044 gr/cm^3
Titik Leleh	:	360˚C
Titik Didih	:	1327˚C
Kelarutan dalam Air	:	85 gr/ 100 gr H_2O
Kemurnian	:	99%

7. HCl (Pro Analis)

Spesifikasi Asam Klorida

Rumus Molekul	:	HCl
Berat Molekul	:	36,458 gr/mol
Tekanan Uap	:	84 mm Hg (20 C)
Titik Didih	:	50,5˚C
Kelarutan Dalam Air	:	100%
Keasaman	:	< 1 pKa
Kemurnian	:	99%

8. NaOH (Pro Analis)

Spesifikasi Natrium Hidroksida

Rumus Molekul	:	NaOH
Berat Molekul	:	40 gr/mol
Spesifik Gravity	:	2,13
Titik Didih	:	1338˚C
Kelarutan Dalam Air	:	100%
Mh	:	13,5
Kemurnian	:	99%

9. $BaCl_2$ (*Extra Pure*)

Spesifikasi Barium Diklorida

Rumus Molekul	:	$BaCl_2$
Berat Molekul	:	208,31 gr/mol
Spesifik Gravity	:	3,9
Titik Didih	:	1560˚C
Kelarutan Dalam Air	:	59%
Warna	:	Putih
Kemurnian	:	>85%

10. $Na_2B_4O_7.10H_2O$ (Pro Analis)

Spesifikasi Sodium Borate

Rumus Molekul	:	$Na_2B_4O_7.10H_2O$
Berat Molekul	:	201,22 gr/mol
Spesifik Gravity	:	2,367
Densitas	:	381,37 gr/mol
Kelarutan Dalam Air	:	59%
Titik Didih	:	320 ˚C
Kemurnian	:	99%

11. $(COOH)_2$ (Pro Analis)

Spesifikasi Asam Oksalat

Rumus Molekul	:	$(COOH)_2$
Berat Molekul	:	90,04 gr/mol
Spesifik Gravity	:	1,9
Warna	:	Putih
Kelarutan Dalam Air	:	1 gr/ 2 ml
Titik Leleh	:	189,5 ˚C
Kemurnian	:	99%

III.3.2 Alat yang Digunakan

1. Rangkaian *Wetted Wall Column* (WWC)
2. *Beaker Glass* & Erlenmeyer
3. Burret & Statif
4. Spatula
5. Pipet Tetes & Pipet Volum
6. Corong Kaca
7. pH meter
8. Kertas saring Whatman
9. Heater
10. Botol Sampel
11. Termometer
12. *Stopwatch*

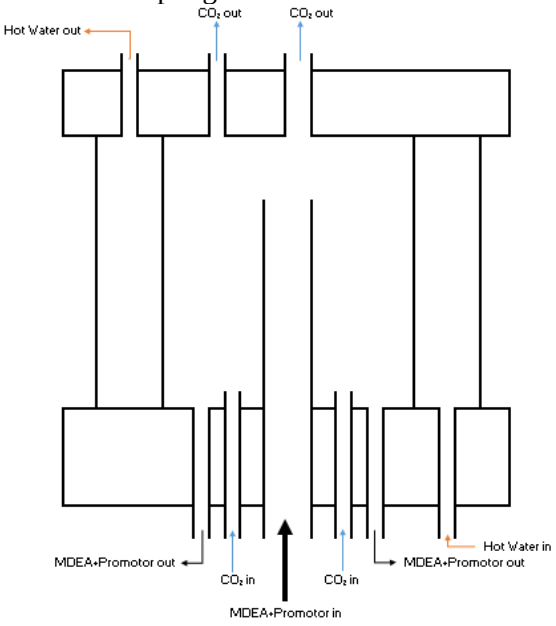
III.4 Langkah Percobaan

Prosedur Percobaan yang akan dilakukan berdasarkan percobaan yang telah dilakukan oleh Altway A., dkk. 2008.

III.4.1 Tahap Persiapan Bahan dan Peralatan Percobaan

a. Mempersiapkan bahan penelitian, berupa campuran gas CO_2 dan N_2, MDEA, *Glycine*, *Gultamic Acid*, Aquades, indikator PP, indikator MO, KOH, NaOH, HCl, Boraks dan Asam Oksalat.

b. Menstandarisasi larutan NaOH 0,1 M menggunakan larutan 10 ml asam Oksalat dan indikator 2 tetes *Phenolphthalein*, serta standarisasi larutan HCl 0,1 M menggunakan 10 ml larutan Boraks dan indikator 2 tetes *Methylorange* (MO).
c. Melarutkan promotor (*Glycine* dan *Glutamic Acid*) dengan aktivator KOH dalam MDEA dan Aquades sesuai variabel.
d. Mempersiapkan peralatan penelitian, seperti bak penampung larutan MDEA, penampung sampel (ampul), erlenmeyer, heater, termometer, pH meter dan *Stopwatch.*
e. Merangkai peralatan WWC
f. Mempersiapkan peralatan analisa berupa buret, erlenmeyer, heater, kertas saring dan corong kaca yang digunakan untuk analisa larutan.
g. Alat dan bahan siap digunakan.



Gambar III. 2 Skema Alat Wetted Wall Column

III.4.2 Tahap Pelaksanaan Percobaan Absorpsi CO_2

a. Mengisi air ke dalam *waterbath* (T1) sebagai pengatur temperatur dalam jaket WWC.
b. Memasukkan larutan MDEA berpromotor ke dalam tangki *reservoir* (T2).
c. Mengatur temperatur sesuai dengan variabel.
d. Mensirkulasikan air panas pada sisi anulus kolom WWC dan kembali ke *waterbath* (T1).
e. Mensirkulasikan larutan MDEA berpromotor menggunakan pompa dari tangki *reservoir* (T2) ke tangki *overflow* (T3) hingga larutan *overflow*.
f. Mengatur laju alir larutan MDEA berpromotor, sehingga larutan mengalir dari bawah ke atas melalui bagian dalam *tube* hingga terbentuk lapisan tipis pada permukaan *tube*.
g. Pada saat temperatur sistem telah mencapai yang diinginkan dan aliran telah stabil, campuran gas CO_2 dan N_2 dialirkan melewati tangki saturator (T5).
h. Kemudian campuran gas CO_2 dan N_2 mengalir dari bawah kolom menuju atas kolom bagian luar pipa *stainless steel* sehingga terjadi kontak antara gas CO_2 dan N_2 dengan lapisan tipis cairan di seluruh permukaan luar *tube* hingga kondisi *steady state*.
i. Apabila tercapai kondisi *steady state*, mengambil sampel larutan MDEA berpromotor pada tangki penampung sampel (T6) untuk dilakukan analisa kandungan karbonat dan bikarbonat.

III.4.3 Analisa Sampel

a. Menyiapkan 5 ml sampel MDEA akhir yang telah kontak dengan CO_2 di erlenmeyer.
b. Tambahkan 50 ml NaOH 0,1 M ke dalam sampel dan diaduk hingga homogen.
c. Tambahkan larutan 25 ml $BaCl_2$ ke dalam sampel dengan pemanasan di heater hingga suhu maksimum 50℃.

d. Diamkan hingga terbentuk endapan dan mengendap di dasar erlenmeyer.
e. Lakukan pemisahan endapan dengan kertas saring *Whatman* dan corong kaca.
f. Cuci endapan yang tersaring dengan aquadest untuk melarutkan sisa NaOH. Pastikan sudah tercuci dengan sempurna.
g. Larutkan endapan dengan 20 ml larutan HCl 0,1 M
h. Panaskan larutan dengan heater selama 2 menit dengan suhu maksimum 50℃.
i. Tambahkan aquadest hingga volume larutan menjadi 75 ml.
j. Tambahkan 2 tetes indikator *Methylorange* (MO) ke dalam sampel sehingga berubah warna menjadi merah.
k. Lakukan titrasi sampel dengan NaOH 0,05 M hingga pH mendekati 7 (warna sampel menjadi kuning).
l. Catat volume NaOH 0,05 M yang digunakan.

III.4.3 Evaluasi Data

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

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

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

- Perhitungan mol bikarbonat (Karl Anders Hoff, 2003):

$$C_{CO2} = \frac{(V\text{HCl} - Vt - \Delta Vb)\text{x } C \text{ NaOH}}{2 \text{ x } Vs} \qquad (3.2)$$

V HCl merupakan volume total HCl 0,1 M yang ditambahkan dalam pelarutan endapan. *Vt* adalah volume NaOH 0,1 M yang dititrasi. *Vb* adalah selisih volume NaOH 0,05 M yang dititrasi dan HCl 0,1 M yang ditambahkan pada larutan

kontrol sampel sebelum kontak dengan CO_2. (Karl Anders Hoff, 2003).

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

$$q = v \times ([\mathrm{CO_2}]\text{akhir} - [\mathrm{CO_2}]\text{mula} - \text{mula}) \tag{3.3}$$

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

$$[\mathrm{OH^-}] = \frac{K_W}{K_2}\frac{[\mathrm{CO_3^{2-}}]}{[\mathrm{HCO_3^-}]} \tag{3.4}$$

$$[\mathrm{CO_2}]_\mathrm{e} = \frac{K_2 K_4}{K_3}\frac{[\mathrm{HCO_3^-}]^2}{[\mathrm{CO_3^{2-}}]} \tag{3.5}$$

- Nilai K_w, K_1, K_2, K_3, dan K_4 didapat dari persamaan berikut:

$$K_W = \exp\left(140{,}932 - \frac{13445{,}9}{T} - 22{,}4773 \ln T)\right) \tag{3.6}$$

(Guo-Wen Xu dkk, 1998; Edwards, 1976)

$$K_1 = \exp\left(235{,}482 - \frac{12092{,}10}{T} - 36{,}7816 \ln T\right) \tag{3.7}$$

(Guo-Wen Xu dkk, 1998; Edwards, 1976)

$$K_2 = \exp\left(220{,}067 - \frac{12431{,}7}{T} - 35{,}4819 \ln T\right) \tag{3.8}$$

(Guo-Wen Xu dkk, 1998; Edwards, 1976)

$$K_4 = \left(\frac{1}{10^{(-14{,}01+0{,}0184T)}}\right) \tag{3.9}$$

(Guo-Wen Xu dkk, 1998; Barth, 1984)

Tidak semua konstanta kesetimbangan *independent*, pada kasus ini konstanta kesetimbangan yang *independent* hanyalah *Kw*, K_1, K_2, dan K_4. Adapun konstanta kesetimbangan K_3 dapat diperoleh dengan persamaan:

$$K_3 = K_1 \times K_4 \tag{3.10}$$

- Perhitungan nilai $[CO_2]_i$ didapatkan dengan cara trial k_{ov}, menggunakan persamaan (Altway, 2008) :

$$[\mathrm{CO_2}]_\mathrm{i} = \frac{k_g P_A + [\mathrm{CO_2}]_\mathrm{e}\sqrt{D_{AL}k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL}k_{ov}}} \tag{3.11}$$

- Nilai koefisien difusivitas dalam gas diperoleh dari persamaan Wilke Chang (Wilke dan Chang, 1955):

$$D_{AG} = \left[\frac{T}{298{,}15\ \mathrm{K}}\right]^{1{,}75} x\ 0{,}167x\ 10^{-4} \tag{3.12}$$

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

$$D_{AL/BL} = 1{,}173\ x\ 10^{-16}\sqrt{(\varphi M_B)}\frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}} \tag{3.13}$$

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

$$k_g = \frac{Sh\ D_{AG}}{R\ T\ h} \tag{3.14}$$

dimana,

$$Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g\ D_{AG}} \tag{3.15}$$

$$V = \frac{4\ x\ Q_G}{\pi\ x\ d^2} \tag{3.16}$$

$$Re = \frac{\rho_g\ v\ h}{\mu_g} \tag{3.17}$$

(Geaankoplis, 1993)

$$Sh = 1.075\ (Re\ Sc\ \frac{d}{h})^{0.85} \qquad (3.18)$$

- Data kelarutan di dapat dari persamaan konstanta Henry:

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

$$H^0_{eI} = H^0_e\ 298 \exp\left(\frac{-d \ln kH}{d(\frac{1}{T})} x \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right)$$

(Yi dkk, 2009; Weinsenberger dan Schumpe, 1996)

- Data $\left(\frac{-d \ln kH}{d(\frac{1}{T})}\right)$ untuk komponen CO_2 yang diperoleh dari literatur yaitu 2400 K (Sander et al., 1999).

- Menentukan koefisien transfer sisi liquida :

$$\delta = \left[\frac{3\mu\vartheta}{\rho g \pi D}\right]^{1/3}$$

$$Vmax = \frac{\rho g \delta^2}{2\pi}$$

$$k_L = \sqrt{\frac{4\ x\ D_{AB} x\ Vmax}{\pi h}}$$

- Setelah didapatkan nilai $[CO_2]_i$ dari persamaan (3.11), maka nilai k_{ov} dapat ditentukan dari persamaan (Danckwerts, 1970):

$$\varphi = \left(\frac{\frac{Q}{t} x\ k_g\ x\ H_e}{k_g\ P_A - C_{Ae} k_g H_e - \frac{Q}{t}}\right)$$

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

- Menentukan nilai k_{app} dari persamaan dibawah ini

$$k_{app} = k_{ov} - k_{OH^-}[OH^-] - k_{MDEA}\ [\text{MDEA}]$$

dimana:

$$k_{app} = k_{Glycine}[Glycine + k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}\ [L\text{-}Glutamic\ Acid]$$

- Harga k_{OH^-} dan k_{MDEA} diperoleh dari persamaan berikut :

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

(Danckwerts, 1970)

$$k_{MDEA} = 4{,}01 \times 10^8 \exp\left(\frac{-5400}{T}\right)$$

(Ko dan Li, 2000; Pawlak, 2011)

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

$$k_{promotor} = A_{promotor} e^{\frac{-E}{RT}}$$

$$\ln k_{promotor} = \ln A - \frac{E}{RT}$$

Keterangan:

- Kondisi reaksi pada absorpsi CO_2 dalam larutan MDEA berpromotor umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai $3 < Ha < \frac{1}{2} Ei$, dimana (Danckwerts, 1970; Lin dan Shyu, 1999):

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

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{[R_3N]}{z\,[CO_2]_i} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}}$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

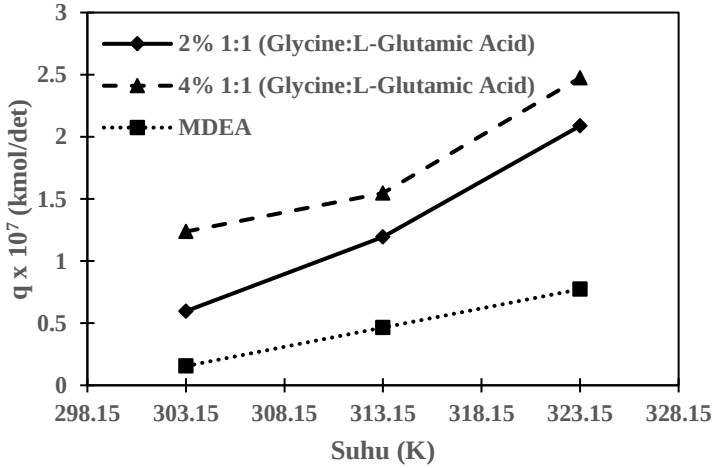
BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan data kinetika reaksi absorpsi CO_2 dalam larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) berpromotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* menggunakan *Wetted Wall Column* (WWC) serta membandingkan kinetika yang didapatkan pada penelitian ini dengan literatur. Penelitian dilakukan pada kondisi operasi tekanan atmosferik dengan variabel temperatur yakni, 303,15 – 323,15 K. Campuran gas yang digunakan adalah 40% CO_2 dan 60% N_2. Sistem larutan terdiri dari larutan 40% berat MDEA dengan variasi konsentrasi promotor 2% dan 4% berat. Promotor terdiri dari *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* dimana pada setiap variasi promotor memiliki variasi *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* dengan komposisi 1:1, 1:2 (*Glycine:L-Glutamic Acid)*, 2:1 (*Glycine:L-Glutamic Acid)*, 0:1 (*L-Glutamic Acid* murni*)*, dan 1:0 (*Glycine* murni*)*. Laju alir larutan dipertahankan pada 200 mL/menit supaya aliran berada dalam kondisi laminar, sehingga lapisan film tipis yang terbentuk tetap berada dalam kondisi *steady state*.

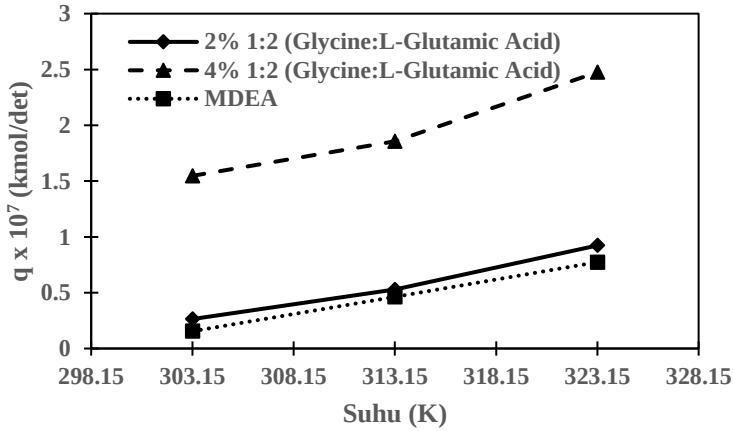
IV.1 Pengaruh Kenaikan Temperatur Terhadap Laju Absorpsi CO_2

Dari Persamaan (3.3), dapat diketahui bahwa laju absorpsi CO_2 (q) dipengaruhi oleh konsentrasi promotor dan temperatur. Pengaruh konsentrasi promotor dan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 seperti yang disajikan dalam **Gambar IV.1** hingga **Gambar IV.5**. Dapat dilihat pada kelima gambar, bahwa semakin meningkatnya suhu, maka laju absorpsi CO_2 akan semakin meningkat. Pada Gambar IV.1 dapat dilihat bahwa untuk konsentrasi promotor 2% berat dengan komposisi 1:1 pada temperatur 303,15 K laju absorpsi CO_2 sebesar 5,97 x 10^{-8} kmol/det. Pada temperatur 313,15 K laju absorpsi CO_2 sebesar 1,19 x 10^{-7} kmol/det (2 kali lebih besar). Sedangkan pada temperatur 323,15 K laju absorpsi CO_2 sebesar 2.09 x 10^{-7} kmol/det (3,5 kali

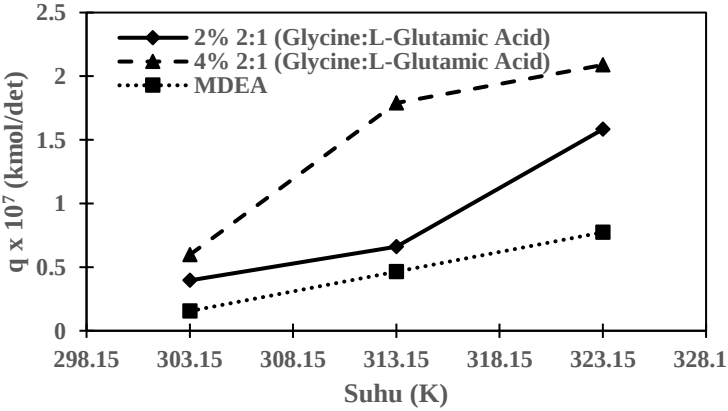
lebih besar). Hasil ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Gimeno dkk (2013) bahwa terjadi peningkatan laju absorpsi CO_2 seiring dengan meningkatnya temperatur. Begitu pula dengan penelitian Yih dkk (1987) yang mengatakan bahwa walaupun peningkatan temperatur akan menurunkan kelarutan CO_2 pada pelarut, hal ini juga akan menurunkan viskositas larutan dan meningkatkan laju reaksi kimia sehingga meningkatnya suhu akan berakibat pada peningkatan laju absorpsi CO_2. Hal ini terjadi karena adanya pengaruh dari energi kinetik molekul-molekul zat yang bereaksi. Energi kinetik molekul-molekul zat akan bertambah ketika temperatur dinaikkan, hal ini akan menyebabkan reaksi menjadi semakin cepat. Dikarenakan energi kinetik yang bertambah, maka gerakan molekul-molekul zat yang bereaksi menjadi semakin cepat.



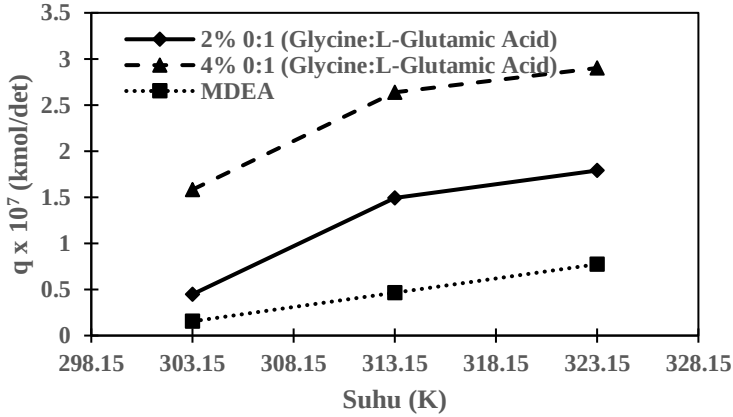
Gambar IV.1 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 1:1



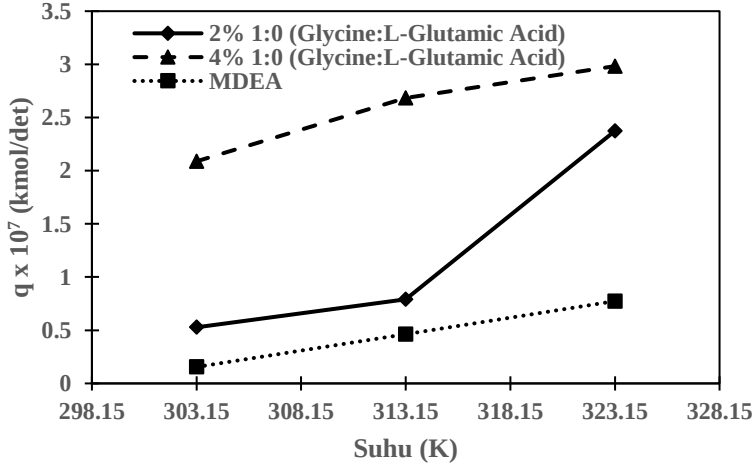
Gambar IV.2 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 1:2



Gambar IV.3 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 2:1



Gambar IV.4 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 0:1



Gambar IV.5 Pengaruh kenaikan temperatur terhadap laju absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor dengan komposisi 1:0

Dari gambar **IV.1-IV.5**, urutan tingkat laju absorpsi mulai dari yang terbesar didapatkan pada system *L-Glutamic Acid* murni (0:1) > *Glycine* murni (1:0) > campuran dengan dominan *L-Glutamic* 1:2 (*Glycine:L-Glutamic Acid)* > campuran dengan dominan *Glycine* 1:2 (*Glycine:L-Glutamic Acid)* > MDEA. Dapat terlihat bahwa system yang menggunakan 1 promotor lebih baik daripada system dengan 2 promotor, namun system dengan 2 promotor jauh lebih baik daripada sistem tanpa promotor (MDEA)

IV.2 Pengaruh Rasio Promotor Terhadap Laju Absorpsi CO_2

Pada penelitian ini memiliki dua variabel promotor yakni 2% dan 4% berat promotor. Dimana masing-masing variabel memiliki variasi komposisi yakni 1:1, 1:2, 2:1, 0:1, dan 1:0. Pada Gambar IV.1 untuk komposisi 1:1 pada suhu 313,15 K dapat dilihat untuk laju absorpsi CO_2 pada MDEA murni sebesar 4,64 x 10^{-8} kmol/det. Pada konsentrasi 2% berat promotor laju absorpsi CO_2 sebesar 1,19 x 10^{-7} kmol/det (2,6 kali lebih besar). Sedangkan pada konsentrasi 4% berat promotor laju absorpsi CO_2 sebesar 1,55 x 10^{-7} kmol/det (3,3 kali lebih besar). Sesuai dengan penelitian Kuettel (2016) dan Yih (1987) bahwa penambahan promotor akan mempercepat laju absrobsi CO_2. Penambahan asam amino sebagai promotor dikarenakan reaksi MDEA dengan CO_2 berjalan lambat apabila dibanding dengan *alkanolamine* yang lain. Penambahan asam amino ini akan mempercepat laju absorpsi CO_2 karena asam amino memiliki fungsi yang sama seperti *alkanolamine* dalam absorpsi CO_2, dan merupakan amina primer yang sangat reaktif dengan CO_2. Reaksi CO_2 dengan asam amino lebih stabil dibandingkan dengan reaksi CO_2 dengan *alkanolamine* (Holst, 2009).

IV.3 Kereaktifan Promotor pada Absorpsi CO_2

Kereaktifan *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* sebagai promotor dalam absorpsi CO_2 dapat ditentukan dari nilai konstanta kecepatan reaksinya. Nilai $k_{Glysine}$ dan $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ diperoleh dari k_{app} sesuai Persamaan (3.27). Untuk menentukan parameter

kinetika reaksi digunakan metode regresi linier. Regresi linear adalah alat statistik yang dipergunakan untuk mengetahui pengaruh antara satu atau beberapa variabel terhadap satu buah variabel. Variabel yang mempengaruhi sering disebut variabel bebas, variabel independen atau variabel penjelas. Variabel yang dipengaruhi sering disebut dengan variabel terikat atau variabel dependen. Secara umum regresi linear terdiri dari dua, yaitu regresi linear sederhana yaitu dengan satu buah variabel bebas dan satu buah variabel terikat; dan regresi linear berganda dengan beberapa variabel bebas dan satu buah variabel terikat. Pada penelitian ini digunakan regresi linier berganda untuk mendapatkan nilai konstanta laju reaksi promotor. Pada penilitian kali ini akan didapatkan nilai k untuk MDEA murni, *Glycine* dalam sistem campuran, *L-Glutamic Acid* dalam sistem campuran, *Glycine* dalam sistem murni, serta *L-Glutamic Acid* dalam sistem murni. Sistem campuran terdiri dari MDEA, *Glycine* dan *L-Glutamic Acid*. Sedangkan sistem murni terdiri dari MDEA, dan promotor. Nilai k untuk sistem campuran didapatkan dari data semua variabel, sedangkan untuk sistem murni menggunakan data konsentrasi 2% dan 4% berat promotor dengan komposisi 0:1 untuk *L-Glutamic Acid* dan 1:0 untuk *Glycine*, dimana pada penulisan selanjutnya promotor dengan sistem murni akan di tulis sebagai (nama promotor)', contoh: *Glycine'*.

Persamaan umum regresi linear yang digunakan untuk perhitungan k_{app} prediksi sistem campuran adalah sebagai berikut:

$$\sum \mathrm{yx1} = \mathrm{b1} \sum \mathrm{x1}^2 + \mathrm{b2} \sum \mathrm{x1x2}$$

$$\sum \mathrm{yx2} = \mathrm{b1} \sum \mathrm{x1x2} + \mathrm{b2} \sum \mathrm{x2}^2$$

Dimana, $\mathrm{y}' = \mathrm{b1x1} + \mathrm{b2x2}$

y = k_{app} eksperimen; x1 = konsentrasi *Glycine* (kmol/m^3);

y' = k_{app} prediksi; x2 = konsentrasi *L-Glutamic Acid* (kmol/m^3);

b1 = $k_{Glycine}$; b2 = $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$.

Dari persamaan linear diatas akan diperoleh nilai k promotor untuk setiap temperatur. Nilai kpromotor untuk setiap temperatur ini dikorelasikan menggunakan persamaan *Arhenius*. Persamaan dapat ditulis sebagai berikut:

$$Y = B + m\ X_1$$

Dimana,

$$k_{promotor} = A_{promotor} e^{\frac{-E}{RT}}$$

$$\ln k_{promotor} = \ln A - \frac{E}{RT}$$

Maka,

$$Y = \ln k_{promotor}$$

$$B = \ln A$$

$$m = -\frac{E}{R} \text{ dan } X_1 = \frac{1}{T}$$

Dengan menggunakan program aplikasi *Analysis Toolpak –VBA* pada *Microsoft Excel* untuk *Glycine* didapatkan nilai (-E/R) adalah sebesar -11604,675 dan nilai B adalah sebesar 48,417 dengan nilai anti-ln B sebesar 1,06 x 10^{21}, sehingga diperoleh persamaan $k_{Glycine}$ = 1,06 x $10^{21}\ e^{-\frac{11604,675}{T}}$. Nilai k *L-Glutamic Acid* didapatkan nilai (-E/R) adalah sebesar -9576,504 dan nilai B adalah sebesar 42,51 dengan nilai anti-ln B sebesar 2,90 x 10^{18}, sehingga diperoleh persamaan $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ = 2,90 x $10^{18}\ e^{-\frac{9576,504}{T}}$.

Pada sistem murni persamaan umum regresi linear yang digunakan untuk perhitungan k_{app} prediksi adalah sebagai berikut:

$$y' = \frac{\sum xy}{\sum x^2}$$

Dimana, y = k_{app} eksperimen; y' = k_{app} prediksi atau k promotor; x = konsentrasi promotor (kmol/m^3). Dari persamaan linear diatas akan diperoleh nilai k promotor untuk setiap temperatur. Setelah mendapat semua nilai, maka digunakan persamaan *Arrhenius* untuk mendapatkan nilai k promotor. Dengan menggunakan program aplikasi *Analysis Toolpak–VBA* pada *Microsoft Excel* untuk *Glycine'* didapatkan nilai (-E/R) adalah sebesar -10443,762 dan

nilai B adalah sebesar 45,293 dengan nilai anti-ln B sebesar 4,68 x 10^{19}, sehingga diperoleh persamaan $k_{Glycine'} = 4{,}68 \times 10^{19}\, e^{-\frac{10443{,}762}{T}}$. Nilai k *L-Glutamic Acid'* didapatkan nilai m (-E/R) adalah sebesar -8020,248 dan nilai B adalah sebesar 38,182 dengan nilai anti-ln B sebesar 3,82 x 10^{16}, sehingga diperoleh persamaan $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid'} = 3{,}82 \times 10^{16}\, e^{-\frac{8020{,}248}{T}}$. Nilai k_{MDEA} didapatkan nilai (-E/R) adalah sebesar -14784,199 dan nilai B adalah sebesar 52,62 dengan nilai anti-ln B sebesar 7,13 x 10^{22}, sehingga diperoleh persamaan $k_{MDEA} = 7{,}13 \times 10^{22}\, e^{-\frac{-14784{,}199}{T}}$. Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai kinetika reaksi absorpsi CO_2 kedalam berbagai macam pelarut dan promotor, berikut merupakan tabel perbandingan berbagai macam pelarut dan promotor yang biasa digunakan dalam proses absorpsi CO_2 menggunakan alat WWC:

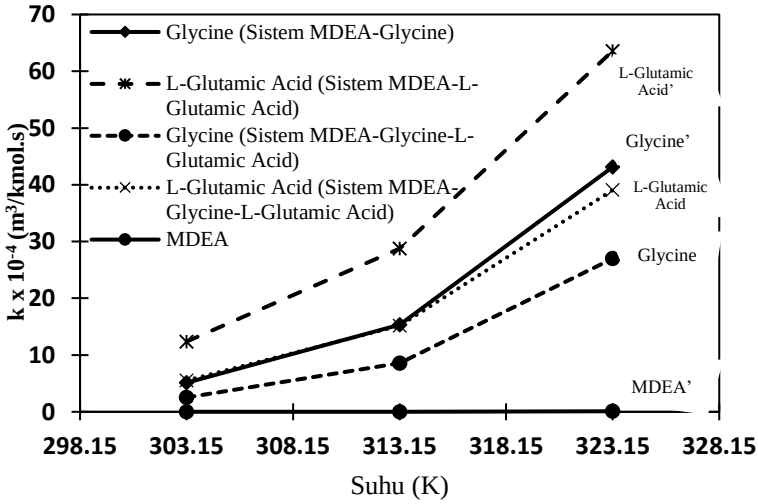
Tabel IV. 1 Perbandingan persamaan konstanta laju reaksi absorpsi CO_2 pada berbagai macam pelarut dan promotor

Pelarut/Promotor	**Nilai k (m^3/kmol.det)**	**Referensi**
MDEA (Sistem MDEA)	2.661 x 10^{11} exp(6573/T)	Haimour dkk, 1987
MDEA (Sistem MDEA-MEA)	2.58 x 10^{8} exp(3736.5/T)	Ramachandran dkk, 2006
Piperazine (Sistem MDEA-Piperazine)	2.572 x 10^{12} exp(5211/T)	Edali M dkk, 2010
Arginine (Sistem K_2CO_3-Arginine)	2.58 x 10^{16} exp(8645/T)	Shen dkk, 2013
Arginine (Sistem MDEA-Arginine-L-Glutamic Acid)	5.86 x 10^{15} exp(7752.798/T)	Haikal dkk, 2017

Tabel IV. 1 Perbandingan persamaan konstanta laju reaksi absorpsi CO_2 pada berbagai macam pelarut dan promotor (continued)

Pelarut/Promotor	**Nilai k (m^3/kmol.det)**	**Referensi**
L-Glutamic Acid (Sistem MDEA-Arginine-L-Glutamic Acid)	6.72×10^{14} exp(7091.198/T)	Haikal dkk, 2017
Arginine (Sistem MDEA-Arginine)	1.73×10^{14} exp(6660.329/T)	Haikal dkk, 2017
L-Glutamic Acid (Sistem MDEA-L-Glutamic Acid)	1.09×10^{13} exp(5857.554/T)	Haikal dkk, 2017
MDEA (Sistem MDEA)	1.14×10^{16} exp(9567.053/T)	Haikal dkk, 2017
Glycine (Sistem MDEA-Glycine-L-Glutamic Acid)	$1{,}06 \times 10^{21}$ exp(11604,675 /T)	Hasil Percobaan
L-Glutamic Acid (Sistem MDEA-Arginine-L-Glutamic Acid)	$2{,}90 \times 10^{18}$ exp(9576,504 /T)	Hasil Percobaan
Glycine' (Sistem MDEA-Glycine)	$4{,}68 \times 10^{19}$ exp(10443,762/T)	Hasil Percobaan
L-Glutamic Acid' (Sistem MDEA-L-Glutamic Acid)	$3{,}82 \times 10^{16}$ exp(8020,248/T)	Hasil Percobaan
MDEA (Sistem MDEA)	$7{,}13 \times 10^{22}$ exp(14784,199/T)	Hasil Percobaan

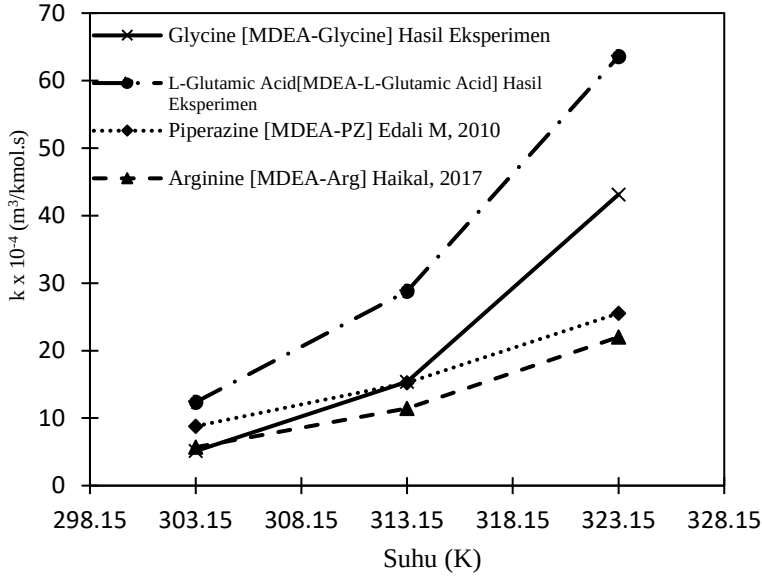
Berikut adalah plot grafik dari nilai k hasil percobaan pada temperatur 303.15 K hingga 323.15 K berdasarkan **Tabel IV.1**:



Gambar IV. 6 Hubungan nilai k dengan T(K) pada absorpsi CO_2 dalam MDEA tanpa promotor dan MDEA berpromotor yang diperoleh dari penelitian ini pada temperatur 303.15 – 323.15 K

Berdasarkan **Gambar IV.6**, dapat dianalisa apakah dengan penggunaan campuran 2 macam promotor akan menghasilkan nilai k yang lebih tinggi daripada 1 macam promotor dengan persentase berat yang sana. Hasil yang didapat adalah nilai $k_{L\text{-}GlutamicAcid}$ sistem murni memiliki nilai k paling besar dibandingkan dengan nilai k yang lain dan juga nilai k sistem murni lebih tinggi dibanding sistem campuran. Nilai $k_{Glycine}$ sistem murni memiliki nilai yang hampir sama dengan nilai $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ sistem campuran pada suhu 303,15 K dan 313,15 K. Sementara nilai k_{MDEA} sangat kecil (hasil tertinggi 9,6 x 10^2 m^3/kmol.s pada suhu 50^{o}C) sehingga berada pada posisi lebih rendah di grafik dibandingkan nilai $k_{Glycine}$ yang merupakan nilai terendah k dengan tambahan promotor (2,53 x 10^4 pada 30^{o}C). Hal ini dapat membuktikan bahwa penambahan

promotor pada MDEA dapat meningkatkan laju reaksi absorpsi CO_2 dengan sangat baik. Pada promotor asam amino yang digunakan (*Glycine* dan *L-Glutamic Acid*) juga terjadi reaksi absorpsi CO_2, sehingga jumlah CO_2 yang diserap juga semakin meningkat seiring ditambahkannya promotor. Hal ini sesuai dengan percobaan yang dilakukan oleh Sema dkk (2012) bahwa penambahan promotor pada MDEA dapat meningkatkan kinetika reaksinya.



Gambar IV. 7 Hubungan nilai k dengan T(K) pada absorpsi CO_2 dalam berbagai pelarut dan promotor yang diperoleh dari penelitian ini dan literatur pada temperatur 303.15 – 323.15 K

Adapun berdasarkan **Gambar IV.7** dapat dilihat bahwa nilai kinetika reaksi $k_{Glycine}$ memiliki nilai k dibawah *Arginine* pada suhu 303,15 dan diatas *Arginine* pada suhu 313,15 dan 323,15. Hal yang serupa terjadi jika dibandingkan dengan *piperazine* yang juga nilai k berada dibawah *piperazine* pada suhu 303,15; namun pada

suhu 313,15 memiliki nilai yang hampir sama dan diatas *piperazine* pada suhu 323,15. Dan untuk nilai $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ memiliki nilai diatas *piperazine* dan *arginine* pada semua *range* suhu.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

BAB V
KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian kinetika reaksi absorpsi karbon dioksida (CO_2) kedalam larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) berpromotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* menggunakan peralatan *Wetted Wall Column* (WWC) dengan konsentrasi MDEA sebesar 40% berat pada temperatur 303,15 K hingga 323,15 K, dapat disimpulkan bahwa :

1. Persamaan kinetika reaksi absorpsi CO_2 (m^3/kmol.det) yang didapatkan adalah:
   - $k_{Glycine} = 1{,}06 \times 10^{21} \exp(-11604{,}675/T)$ (sistem MDEA-*Glycine-L-Glutamic Acid*)
   - $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid} = 2{,}90 \times 10^{18} \exp(-9576{,}504/T)$ (sistem MDEA-*Glycine-L-Glutamic Acid*)
   - $k_{Glycine} = 4{,}68 \times 10^{19} \exp(-10443{,}762/T)$ (sistem MDEA-*Glycine*)
   - $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid} = 3{,}82 \times 10^{16} \exp(-8020{,}248/T)$ (sistem MDEA-*L-Glutamic Acid*)
   - $k_{MDEA} = 7{,}13 \times 10^{22} \exp(-14784{,}199/T)$ (sistem MDEA)
2. Nilai kinetika reaksi $k_{Glycine}$ memiliki nilai k dibawah *Arginine* pada suhu 303,15 dan diatas *Arginine* pada suhu 313,15 dan 323,15. Hal yang serupa terjadi jika dibandingkan dengan *piperazine* yang juga nilai k berada dibawah *piperazine* pada suhu 303,15; namun pada suhu 313,15 memiliki nilai yang hampir sama dan diatas *piperazine* pada suhu 323,15. Dan untuk nilai $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ memiliki nilai diatas *piperazine* dan *arginine* pada semua *range* suhu.

5.2 Saran

1. Mencoba variasi promotor lain seperti *Monosodium Glutamat*, dan *lysine*
2. Memodifikasi alat dengan menambahkan distributor CO_2 pada WWC sehingga kontak lebih menyeluruh

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

Altway, Ali. (2008). *Perpindahan massa disertai reaksi kimia*. Jakarta: Bee Marketer Institut.

Amrin, A.S. dan Utari, A.A.S. (2017). *Studi Kinetika Reaksi Absorpsi Gas Co_2-No_2 Menggunakan MDEA Berpromotor Campuran Asam Amino.* Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Aroonwilas, A. and Veawab, A. (2004). *Characterization and comparison of CO_2 absorption performance into single and blended alkanolamines in a packed column*, Ind. Eng. Chem. Res, 43: 2228-2237.

Barth, D., Tondre, C., Lappal, G. And Delpuech, J.J. (1984). *Kinetic study of carbon dioxide reaction with tertiary amines in aqueous solution*, Am. Chem. Soc., 85:3660-3667.

Benamor, A., Singto, S., Supap, T., Idem, R., Tontiwachuwuthikul, P., Tantayanon, S., and Al-Marri, M.J. (2016). *Snythesis of new amines for enhanced carbon dioxide (CO_2) capture performance : The effect of chemical structure on equilibrium solubility, cyclic capacity, kinetics of absorption and regeneration, and heats of absorption and regeneration*. Separation and Purification Technology Journal, 167, 97-107.

Bishnoi, P.S and Rochelle, G.T. (2000). *Absorption of carbon dioxide into aqueous piperazine: Reaction kinetics, mass transfer and solubility*. Chem. Eng. Sci., 55(22), 5531-5543.

Buckingham, P., (1964). *Fluor solvent process plants: how they are working*. Hydrocarbon Process, 43, 113.

Danckwerts, P.V. (1970). *Gas-liquid reactions*. New York: McGraw-Hill.

Donsius, Fuadi, A. (2017). Studi Absorpsi CO_2 dalam Larutan MDEA-TEA dengan Katalis PZ. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dave, N., Do, T., Puxty, G., Rowland., Feron, P. H. M. And Attalla, M. I. (2009). *CO_2 capture by aqueous amines and aqueous ammonia – A Comparison*, CSIRO Energy Technology, 949-954.

Edwards, T.J., Maurer, G., Newman, J. and Prausnitz, J.M. (1978). *Vapor-Liquid equilibria in multicomponent aqueous solutions of volatile weak electrolytes*. AIChE J., 24(6), 966-976.

Elhosane, Yosry & Atway, Ali & Susianto. (2016). *Kinetic study of carbon dioxide absorption into glycine promoted methyl di ethanolamine (Mdea)*. International Journal of Technology and Engineering Studies, vol. 2, no. 2, pp. 47-52.

Faiz R, and Al-Marzouqi M. (2011). *Insights on natural gas purification: Simultaneous absorption of CO_2 and H_2S using MEA in hollow fiber membrane contactors*. Journal of Separation and Purification Technology, 76, 351-361.

Fang, M. X., Xia, Z.X., Xiang, Q.Y., and Zhou, X.P. (2014) *Experimental study on CO_2 absorption by aqueous ammonia-based blended absorbent*. U.S. National Library of Medicine National Institute of Health, 35(7), 2508-14.

Frauenkron, M., Melder, Johann-Peter, R. Gunther, R. Rossbacher, and Hoke H,. (2002). *Ethanolamines and propanolamines. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*. BASF Aktiengesellschaft, Ludwigshafen, Germany : John Wiley and Sons, Inc.

Geankoplis, Christie J. (1997). *Transport processes and unit operations 3rd edition*. New Delhi: Prentice-Hall of India

Gorak, A. (2005*). European roadmap for process intensification: reactive absorption.* Ohio: Velocys Inc.

Haikal, M. and Ayustiningrum, S. (2017). *Studi Kinetika Absorpsi Co_2 Ke Dalam Larutan Mdea Berpromotor Arginine Dan L-Glutamic Acid Menggunakan Wetted Wall Column* . Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Haimour, N., and Sandall, O.C. (1987). *Absorption of carbon dioxide into aqueous Methyldiethanolamine*. Chemical Engineering Science, 39 (12), 1791-1796.

Holst, J.V., Versteeg G.F., Brilman D.W., Brilman, J.A., and Hogendoorn. (2009). *Kinetic study of CO_2 with various amino acid salts in aqueous solution*. Chemical Engineering Science, 64, 59–68.

Intergorvernmental Panel on Climate Change. (2002). *IPCC special report on carbon dioxide and storage.* New York: Cambridge University Press

Jing, G., Zhou, L., and Zhou, Z. (2012). *Characterization and kinetics of carbon dioxide absorption into aqueous tetramethylammonium glycinate solution*. Chem. Eng. J. 181–182, 85–92.

Ko, J. J. and Li, M. H. (2000). *Kinetics of absorption of carbon dioxide into solutions of N-Methyldiethanolamine + water*. Chemical Engineering Science, 55(19), 161-175.

Kuettel, D.A. (2016). *CO_2 absorption rate improvement of an amino acid salt solvent with an inorganic promoter.* Berlin : Technischn Universitat Berlin

Lin, S.H and Shyu, C.T. (1999). *Performance characteristics and modeling of carbon dioxide absorption by amines in a packed column*. Waste Management, 19, 255-262.

Mahmud, N., Benamor, A., Nasser, M.S., Al-Marri, M.J., Qiblawey, H., Tontiwachwuthikul, P. (2017). *Reaction kinetics of carbon dioxide with aqueous solutions of L-Arginine, Glycine & Sarcosine using the stopped flow technique.* International Journal of Greenhouse Gas Control 63, 47–58

Ma'mun, S. (2005). *Selection and characterization of new absorbents for carbon dioxide capture (Doctoral Thesis).* Norway: Norwegian University of Science and Technology

Olajire, A.A. (2010). *CO_2 capture and separation technologies for end-of-pipe applications*. Journal of Separation and Purification Technology, 35(6), 2610-2628.

Paul, S., and Thomsen, K. (2012). *Kinetics of absorption of carbon dioxide into aqueous potassium salt of proline. Int. J. Greenhouse Gas Control*, 8, 169–179.

Pawlak, H. K., Siemeniec, M., Chacuk, A. (2011). *Reaction kinetics of CO_2 in aqueous methyldiethanolamine solutions using the stopped-flow technique.* Chemical and Process Engineering, 33(1), 7-18.

Pudjiastuti, Lily & Susianto & Altway, Ali & Hestia IC, Maria & Arsi, Kartika. (2015). *Kinetic study of carbon dioxide absorption into glycine promoted diethanolamine (DEA)*. AIP Conference Proceedings. 1699. 060011. 10.1063/1.4938365.

Ramachandran, N., Aboudheir, A., Idem, R., Tontiwachwuthikul, P. (2006). *Kinetics of absorption of CO_2 into mixed aqueous loaded solutions of Monoethanolamine and Methyldiethanolamine.* Ind. Eng. Chem. Res, 45(8), 2608-2616.

Sander Charles R,. (1999). *Compilation of Henry's law constants for inorganic and organic species of potential importance in environmental chemistry*. Max Planck Institute of Chemistry Journal, 3, 57.

Sema, T. (2012). *Comprehensive mass transfer and reaction kinetics studies of CO_2 absorption into aquous solutions of blended MDEA-MEA*. China: Hunan University

Servatius, B.A. (2012). *Absorpsi gas CO_2 melalui kontaktor membran serat berongga menggunakan larutan penyerap tunggal dan campuran senyawa amina: pengaruh laju alir CO_2*. Depok: Universitas Indonesia

Shen, S., Feng, X., and Zhao, R. (2013). *Kinetic study of carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by arginine*. Chemical Engineering Journal, 222, 478-487.

Tan, Chung-Sung. (2012). *A review of CO2 capture by absorption and adsorption*. Taiwan: National Tsing Hua University

Thee, H., Nicholas, N.J., Smith, K.H., Da Silva, G., Kentish, S.E., Stevens, G.W. (2013). *A kinetic study of CO_2 capture with potassium carbonate solutions promoted with various amino acids: Glycine, sarcosine and proline.* Australia: The University of Melbourne

Tiurlan Susanti Sitorus, Yasmikha & Sucita Taurina, Hanna & Altway, Ali & Rahmawati, Yeni & Nurkhamidah, Siti. (2017). *Kinetics study of carbon dioxide absorption reaction into the promoted methyldiethanolamine solution*. AIP Conference Proceedings. 1840. 040003. 10.1063/1.4982270.

Vaidya, P.D., Konduru, P., Vaidyanathan, M., and Kenig, E.Y. (2010). *Kinetics of carbon dioxide removal by aqueous alkaline amino acid salts*. Ind. Eng. Chem. Res., 49, 11067–11072.

Wang, M., Lawal, A., and Stephenson, P., (2011). *Post-combustion CO_2 capture with chemical absorpstion: a state-of-the-art review*. Chemical Engineering Research and Design, 89, 1609-1624.

Weinsenberger, S. and Schumpe, A. (1996). *Estimation of gas solubilities in salt solutions at temperatures from 273 K to 363 K*. AIChE Journal, 42(1), 298-300.

Xiang, Q., Fang, M., Yu H., Maeder M., 2012. *Kinetics of the reversible reaction of CO2(aq) and HCO3—with sarcosine salt in aqueous solution.* J. Phys. Chem. A 116 (42), 10276–10284.

Xu, G.W., Zhang C.F., Qin S.J., Gao W.H., and Liu H.B. (1998), *Gas-liquid equilibrium in a $CO_2 – MDEA – H_2O$ system and the effect of piperazine on it*. Ind. Eng. Chem. Res. 37, 1473–1477.

Yi Fei, Z., Hai-Kui, C., Guang-Wen, and Shao. Lei. (2009*). Modeling and experimental studies on absorption of CO_2*

by benfield solution in rotating packed bed. Chemical Engineering Journal, 145, 377-384.

Yildirim, O., Kiss A.A., Huser, N., Lessman, K., and Kenig, E.Y. (2012). *Reactive absorption in chemical process industry: a review on current activities.* Chemical Engineering Journal, 1(213), 371-391.

DAFTAR NOTASI

DAFTAR NOTASI

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_2O, (m^2 det^{-1})
D_{BL}	Diffusivitas MDEA dalam H_2O, (m^2 det^{-1})
E	Energi aktivasi (kg m^{-2} det^2)
E_i	*Enhancement factor*
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 (Pa m^3 $kmol^{-1}$)
I	Kekuatan ionik larutan (ion m^3)
k_{app}	Konstanta reaksi orde satu semu (det^{-1})
k_{ov}	Konstanta laju reaksi *overall pseudo first order* (det^{-1})
k_{MDEA}	Konstanta laju reaksi antara MDEA dengan CO_2 (m^3 $kmol^{-1}$ det^{-1})
k_{OH-}	Konstanta laju reaksi dari reaksi (2.23)(m^3 $kmol^{-1}$ det^{-1})
k_{H2O}	Konstanta laju reaksi dari reaksi (2.22) (det^{-1})
k_{arg}	Konstanta laju reaksi untuk *arginine* (m^3 $kmol^{-1}$ det^{-1})
k_{app}	Konstanta reaksi orde satu semu antara promotor dan CO_2 (det^{-1})
k_g	Koefisien perpindahan massa sisi gas (kmol m^{-2} det^{-1} Pa^{-1})
k_L	Koefisien perpindahan massa sisi cairan, (m det^{-1})
K_1	Konstanta kesetimbangan ionisasi pertama dari reaksi (2.18) (kmol m^{-3})

K_2	Konstanta kesetimbangan ionisasi kedua dari reaksi (2.19) (kmol m^{-3})
K_3	Konstanta kesetimbangan ionisasi ketiga dari reaksi (2.21)
K_4	Konstanta kesetimbangan ionisasi keempat dari reaksi (2.20) (m^3 $kmol^{-1}$)
K_w	Konstanta kesetimbangan ionisasi air (2.17) ($kmol^2$ m^{-6})
M_B	Berat molekul pelarut (kg mol^{-1})
n	Orde reaksi
P_A	Tekanan parsial CO_2 (Pa)
P_{Ai}	Tekanan parsial CO_2 pada *interface* (Pa)
q	Laju absorpsi total (kmol det^{-1})
Q	Jumlah gas yang terabsorpsi (kmol m^{-2})
r_{ov}	Laju reaksi overall (kmol m^{-3} det^{-1})
R	Konstanta gas (m^3 Pa $kmol^{-1}$ K^{-1})
$\bar{R}$	Laju absorpsi per satuan luas setelah waktu kontak t (kmol m^{-2} det^{-1})
Re	*Reynold number*
Sc	*Schmidt number*
Sh	*Sherwood number*
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 (m^3 $kmol^{-1}$)
v	Laju alir liquida (m^3 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 (kg m^{-1} det^{-1})
φ	Parameter asosiasi pelarut

APPENDIKS

APPENDIKS A

A.1 Menentukan Keadaan *Steady State*

Keadaan *steady state* merupakan kondisi dimana tidak ada perubahan pH dan tidak dipengaruhi oleh waktu. Berdasarkan penelitian didapatkan hubungan pH tiap waktunya, sebagai contoh berikut merupakan data pengukuran pH untuk variabel 2% berat 1:1 pada suhu 30˚C (303.15 K) seperti yang didapatkan sebagai berikut :

Tabel A. 1 Data pengukuran pH larutan setiap waktu

Waktu (menit)	pH
1	10
2	11
3	11

Berdasarkan **Tabel A.1,** diketahui bahwa kondisi *steady state* dicapai pada waktu t = 3 menit. Sehingga sampel yang dianalisa yaitu pada menit ke-3 dan selanjutnya. Pengecekan pH dilakukan di setiap variabel hingga mencapai kondisi *steady state* dan kemudian sampel diambil pada menit *steady state* untuk di analisa.

A.2 Analisa Data

Berikut adalah contoh perhitungan hasil eksperimen pada variabel konsentrasi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* (2% berat 1:1), laju alir pelarut 200 mL/menit, laju alir gas (CO_2 40% dan N_2 balance) yaitu 6 mL/menit, dan temperatur 30˚C (303.15 K).

Analisa Awal Larutan :

Untuk menganalisa kandungan karbonat dan bikarbonat pada sampel, terlebih dahulu 5 ml sampel ditambahkan dengan 50 ml NaOH 0.1 M untuk mengikat CO_2 dalam bentuk bikarbonat dan diubah menjadi karbonat. Selanjutnya ditambahkan 25mL $BaCl_2$ 0.5 M ke dalam sampel dengan sedikit pemanasan yaitu <50˚C. Penambahan $BaCl_2$ akan bereaksi dengan CO_3^{2-} sehingga

membentuk endapan putih $BaCO_3$. Selanjutnya endapan $BaCO_3$ disaring dengan kertas Whatman dan dicuci menggunakan aquadest sebanyak 50 ml (hingga tercuci secara sempurna). Kemudian endapan dilarutkan dengan penambahan 30 ml HCl 0.1 M. Selanjutnya dipanaskan pada suhu rendah dan ditambahkan aquadest hingga volume mencapai 75 ml. HCl berlebih dari proses pelarutan dilakukan *back-titration* menggunakan NaOH 0.1 M. Menentukan mol CO_2 total awal sampel (sebelum kontak dengan CO_2) :

Volume HCl 0.1 M : 30 ml
Volume NaOH 0.05 M pada *Back-titration* : 24.75 ml

$$C_{CO2} = \frac{(VHCl - Vt - \Delta Vb) x\ C\ NaOH}{2\ x\ Vs}$$
$$C_{CO2} = \frac{(30\text{ ml} - 24.75\text{ ml})\text{x } 0.11933\text{ M}}{2\text{ x }5\text{ ml}}$$
$$C_{CO2} = 0.06265\text{ mol/L}$$

Analisa Akhir Larutan :

Untuk mengetahui mol CO_2 akhir pada sampel MDEA berpromotor yang telah dikontakkkan dengan CO_2.

Volume HCl 0.1 M : 30 ml
Volume NaOH 0.05 M pada *Back-titration* : 23.25 ml
Menentukan mol bikarbonat akhir :

$$C_{CO2} = \frac{(VHCl - Vt - \Delta Vb) x\ C\ NaOH}{2\ x\ Vs}$$
$$C_{CO2} = \frac{(20\text{ ml} - 23.23\text{ ml})\text{x } 0.11933\text{ M}}{2\text{ x }5\text{ ml}}$$
$$C_{CO2} = 0.080546\text{ mol/L}$$

A.3 Evaluasi Data

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 m

$\mu_{larutan}$ = 0.002063764 kg/m.s (303.15 K)

$\rho_{larutan}$ = 1044 kg/m^3 (303.15 K)

d = 0.013 m

v = 200 ml/menit = 3.333 x 10^{-6} m^3/det

π = 3.14

Sehingga waktu kontak antara gas dengan larutan adalah :

$$t_c = \frac{2\,(0.093\,m)}{3}\left[\frac{3\left(0.002063764\,\frac{\text{kg}}{\text{m.s}}\right)}{\left(9.8\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)\left(1044\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}\right]^{1/3}\left[\frac{(3.14)(0.013\,m)}{(3.333\,x\,10^{-6}m^3/det)}\right]^{2/3}$$

t_c = 0.278553 detik

Menentukan Laju Absorpsi Gas CO_2 (q) :

Laju alir pelarut (v) = 200 ml/menit = 3.33 x 10^{-6} m^3/det

$CO_{2\ \text{mula-mula}}$ = 0.06265 kmol/m^3

$CO_{2\ \text{akhir}}$ = 0.080546 kmol/ m^3

Sehingga laju absorpsi gas CO_2 adalah :

$q = v$ (CO_2 akhir – CO_2 mula-mula)

$$q = 3.33\text{x}10^{-6}\,\frac{\text{m}^3}{\text{detik}} \times \left(\left[0.080546\frac{\text{mol}}{\text{L}}\right] - \left[0.06265\frac{\text{mol}}{\text{L}}\right]\right)$$

$$q = 5.96636\,\text{x}10^{-8}\,\frac{\text{kmol}}{\text{detik}}$$

Menentukan Laju Rata-rata Absorpsi Q(t)/t (kmol/m^2.s) (Danckwerts, 1970) :

Diameter luas kontak, d = 0.013 m

Tinggi luas kontak, h = 0.093 m

Laju Absorpsi, q = 5.96636 x 10^{-8} kmol/det

π = 3.14

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

$$\frac{Q(t)}{t} = \frac{5.96636\,\text{x}10^{-8}\,\frac{\text{kmol}}{\text{detik}}}{3.14\text{ x }0.013\text{ m x }0.093\text{ m}}$$

$$\frac{Q(t)}{t} = 1.57164 \text{ x} 10^{-5} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2.\text{detik}}$$

Menentukan Konsentrasi Gas CO_2 Terlarut ($[CO_2]_e$) dan $[OH^-]$

Asumsi yang digunakan :

1. Konsentrasi promotor = konstan (tidak terurai)
2. Bikarbonat yg menjadi karbonat sangat sedikit sehingga $[MDEAH^+] = [HCO_3^-]$

Menghitung nilai *Kw* :

$$K_W = \exp\left(140.932 - \frac{13445.9}{T} - 22.4773 \ln T\right)$$

$$K_W = \exp\left(140.932 - \frac{13445.9}{303.15\ \text{K}} - 22.4773 \ln 303.15\ (\text{K})\right)$$

$$K_W = 1.45329 \text{ x} 10^{-14}\ \text{kmol}^2/\text{m}^6$$

Menghitung nilai *K1* :

$$K_1 = \exp\left(235.482 - \frac{12092.10}{T} - 36.7816 \ln T\right)$$

$$K_1 = \exp\left(235.482 - \frac{12092.10}{303.15\ \text{K}} - 36.7816 \ln 303.15\ (\text{K})\right)$$

$$K_1 = 4.63429 \text{ x} 10^{-7}\ \text{kmol}/\text{m}^3$$

Menghitung nilai K_2 :

$$K_2 = \exp\left(220.067 - \frac{12431.7}{T} - 35.4819 \ln T\right)$$

$$K_2 = \exp\left(220.067 - \frac{12431.7}{303.15\ \text{K}} - 35.4819 \ln 303.15\ \text{K}\right)$$

$$K_2 = 5.13134 \text{ x} 10^{-11}\ \text{kmol}/\text{m}^3$$

Menghitung nilai K_4 :

$$K_4 = \left(\frac{1}{10^{(-14.01+0.0184\text{T})}}\right)$$

$$K_4 = \left(\frac{1}{10^{(-14.01+0.0184 \text{ x } 303.15 \text{ K})}}\right)$$

$$K_4 = 270420741.9 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

Menghitung nilai K_3 :

$$K_3 = K_1 \times K_4$$

$$K_3 = 4.63429 \text{ x} 10^{-7} \times 270420741.9$$

$$K_3 = 125.3208$$

Dari reaksi (2.1)

$[MDEAH^+] = [HCO_3^-] = 0.080546$ kmol/m^3

$[MDEA]_{in} = 3.5061665$ kmol/m^3

Mencari $[H^+]$:

$$[H^+] = \left(\frac{[R_3NH^+]}{[R_3N] \text{x} [K_4]}\right)$$

$$[H^+] = \left(\frac{[0.080546 \text{ kmol/m}^3]}{[3.5061665 \text{ kmol/m}^3] \text{x} [270420741.9 \text{ m}^3/\text{kmol}]}\right)$$

$$[H^+] = 8.4951 \text{ x} 10^{-11} \text{ kmol/m}^3$$

Maka $[OH^-]$ adalah :

$$[OH^-] = \left(\frac{Kw}{[H^+]}\right)$$

$$[OH^-] = \left(\frac{1.45329 \text{ x} 10^{-14} \text{ kmol}^2/\text{m}^6}{[8.4951 \text{ x} 10^{-11} \text{ kmol/m}^3]}\right)$$

$$[OH^-] = 0.000171073 \text{ kmol/m}^3$$

Trial Karbonat $[CO_3^{2-}]$ dengan trial K_2 :

$$K_2 Trial = \left(\frac{[CO_3^{2-}] \text{ x } [H^+]}{[CO_2 \text{ akhir}] - [CO_3^{2-}]}\right)$$

Trial dilakukan dengan *Goal Seek* pada Ms. Excel hingga error = 0, dimana error :

$$\text{Error} = K_2 - K_2 Trial$$

Dari trial K_2 diperoleh, $[CO_3^{2-}] = 0.030331$ kmol/ m^3

Dari data $[CO_3^{2-}]$ = 0.030331 kmol/ m^3, selanjutnya menentukan $[OH^-]$:

$$[OH^-] = \frac{K_W}{K_2} \frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]}$$

Dimana data $[HCO_3^-]$ diperoleh dari perhitungan sebagai berikut :

$$[HCO_3^-] = [CO_2]akhir - [CO_3^{2-}]$$

= 0.08054582 kmol/m^3 – 0.0303312 kmol/ m^3

= 0.050214573 kmol/m^3

Maka,

$$[OH^-] = \frac{K_W}{K_2} \frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = \frac{1.45329 \times 10^{-14}}{5.13134 \times 10^{-11}} \times \frac{0.030331}{0.050214573} =$$

0.000171073

Harga $[CO_2]e$ dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$[CO_2]_e = \frac{K_2 K_4}{K_3} \frac{[HCO_3^-]^2}{[CO_3^{2-}]}$$

$$[CO_2]_e = \frac{5.13134 \times 10^{-11} \times 270420741.9}{125.3207} \frac{0.05021^2}{0.030331}$$

$$[CO_2]_e = 9.20486 \times 10^{-6} \text{ kmol/m}^3$$

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 :

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

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

Ci adalah konsentrasi ion – ion yang valensinya Zi.

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

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

Namun pada pelarut MDEA ini tidak terionisasi sehingga I=0

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

$H_e = H_e^0$

Sehingga,

$$H_{e\Gamma}^0 = H_e^0\ 298\ exp\left(\frac{-d\ ln\ kH}{d(\frac{1}{T})}\ x\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{298}\right)\right)$$

Harga $\frac{-d\ ln\ kH}{d(\frac{1}{T})}$ diperoleh dari literatur (Sander et al., 2006) yaitu 2400. H_e^0 298 yaitu 3.3x10^{-7} kmol/m^3.Pa, sehingga :

$$H_{e\Gamma}^0 = 3.3\ \text{x}10^{-7}\ \exp\left(2400\ \text{x}\left(\frac{1}{303.15}-\frac{1}{298}\right)\right)$$

$$= 2.88\ x10^{-7}\ \frac{kmol}{m^3}.Pa$$

$$\frac{1}{H_{e\Gamma}^0} = 3.47\ \text{x}10^6\ \frac{\text{m}^3.\text{Pa}}{\text{kmol}}$$

Menentukan Difusitas CO_2 dan CO_3^{2-}

Diffusivitas CO_2 dalam gas N_2 didapat dari Tabel 6.2-1 (Geankoplis,1993) pada temperatur 298 K sebesar 1.67 x 10^{-5} m^2/det, sehingga perlu dilakukan koreksi temperatur sebagai berikut:

$$D_{AG} = \left[\frac{T}{298.15\ K}\right]^{1,75}\ x\ 0.167x\ 10^{-4}$$

$$D_{AG} = \left[\frac{303.15}{298.15\ K}\right]^{1,75}\ x\ 0.167x\ 10^{-4}$$

$$D_{AG} = 1.71932\ \text{x}\ 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}$$

Difusitas dalam liquid menggunakan persamaan Wilke Chang pada T= 303.15 K (Wilke dan Chang, 1955):

$$D_{AL/BL} = 1.173\ x\ 10^{-16}\sqrt{(\varphi M_B)}\ \frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}}$$

Dimana φ = 2.6

Va (CO_2) = 0.034 m^3/kmol

Va ($C_5H_{13}NO_2$) = 0.1489 m^3/kmol

M_B = 18 kg/kmol
$\mu\ air$ = 0.0008007 Kg/m.s
Sehingga diperoleh :
D_{AL} = 2.31058 x 10^{-9} m^2/s
D_{BL} = 9.52515 x 10^{-10} m^2/s

***Menentukan Koefisien Perpindahan Massa Sisi Gas* (k_G)**

Koefisien Perpindahan Massa sisi Gas (k_G) diperoleh dari persamaan (Cullinane dan Rochelle, 2004) :

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

Dari program Hysys, diperoleh data μ dan ρ gas dengan komposisi 40% CO_2 dan N_2 Balance sebagai berikut :

μ gas = 1.8038 x 10^{-5} kg/m.s
ρ gas = 1.319694 kg/m^3
d = 0.013 m
Laju alir gas, Q_G = 0.0001 m^3/det
h = 0.093 m

-Schmidt number $= Sc\ = \frac{\mu_g}{\rho_g\ D_{AG}}$

$$Sc = \frac{1.8038x10^{-5}\ kg/ms}{1.319694\frac{kg}{m^2}\ x\ 1.71932x10^{-5}\ m^2\ /s} = 0.7949658$$

-Kecepatan rata-rata

$$V\ = \frac{4\ x\ Q_G}{\pi\ x\ d^2}$$

$$V\ = \frac{4\ \text{x}\ 0.001 \text{m}^2/\text{det}}{3.14\ \text{x}\ 0.013\ \text{m}} = 0.753778\ \text{m/s}$$

Reynold Number $= Re$

$$Re = \frac{\rho_g\ v\ d}{\mu_g}$$

$$Re = \frac{1.319694 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{x } 0.753778 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{x } 0.013 \text{ m}}{1.8038 \text{ x } 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m. s}}}$$
$$= 716.93905$$

-*Sh* = Sherwood Number

$$Sh = 1.075 \ (Re \ Sc \ \frac{d}{h})^{0.85}$$
$$Sh \ = 1.075 \ (716.9305 \ x \ 0.7949658 \ \frac{0.013 \ m}{0.093 \ m})^{0.85}$$
$$Sh \ = 44.412569$$

Sehingga,

$$k_g = \frac{Sh \ D_{AG}}{R \ T \ h}$$
$$k_g = \frac{44.412569 \text{ x } \ 1.71932\text{x}10^{-5} \text{ m}^2 \text{ /s}}{8314 \frac{\text{m}^3\text{Pa}}{\text{kmol. K}} \text{ x } 303.15 \text{ K x } 0.093 \text{ m}}$$
$$k_g = \ 3.2577 \text{ x } 10^{-9} \ \frac{\text{kmol}}{\text{s. m}^2\text{Pa}}$$

Menentukan Koefisien Perpindahan Massa Sisi Cairan (K_L)

$$kl = \sqrt{\frac{4 \ x \ D_{AL} x \ Vmax}{\pi h}}$$

dimana,

D_{AL} = Difusifitas liquid (m^2/det)
Vmax = kecepatan liquid max pada aliran (m/s)
h = Panjang area kontak, (m)
ρ_L = Liquid density, (kg/m^3)
μ = Viskositas liquid, (kg/m.s)
g = Gravity acceleration, (9.80665 m/s^2)
k_L = Koefisien perpindahan massa sisi cairan, (kmol/s.m^2)

dimana dibutuhkan:

$$\delta = \left[\frac{3\mu_L \vartheta}{\rho_L g \pi D}\right]^{1/3}$$

ϑ, laju Larutan $= 3.33 \text{ x } 10^{-6}$ m^3/det, sehingga :

$$\delta = \left[\frac{3 \text{ x } 0.002063764 \frac{\text{kg}}{\text{m. s}} \text{ x } 3.33 \text{ x } 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1044 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ x } 9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{x } 3.14 \text{ x } 0.013 \text{ m}}\right]^{1/3}$$

$$\delta = 0.000366878\text{m}$$

Vmax dapat diperoleh:

$$Vmax = \frac{\rho g \delta^2}{2\mu_L}$$

$$Vmax = \frac{1044 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ x } 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{ x } (0.000366878 \text{ m})^2}{2 \text{ x } 0.0020638 \frac{\text{kg}}{\text{m. s}}}$$

$$Vmax = 0.333868217 \text{ m/s}$$

$$kl = \sqrt{\frac{4 \text{ x } D_{AL} x \ Vmax}{\pi h}}$$

$$kl = \sqrt{\frac{4 \text{ x } 2.311 \text{ x } 10^{-9} \text{x } 0.3338682 \text{ m/s}}{3.14 \text{ x } 0.093 \text{ m}}}$$

$$kl = 1.0279 \text{ x } 10^{-4} \text{ m/s}$$

Menentukan Konsentrasi CO_2 dalam Interface ($[CO_2]_i$) dan Konstanta Laju Reaksi Overall Pseudo First Order (k_{ov})

Menentukan nilai K_{ov} menggunakan persamaan (Danckwerts, 1970) :

$$[\text{CO}_2]_\text{i} = \frac{k_g P_A + [CO_2]_e \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \quad \text{……. (a)}$$

$$\frac{Q}{t} = \bar{R} = ([CO_2]_i - [CO_2]_e)\sqrt{D_{AL} x \ k_{ov}} \text{……..(b)}$$

dimana,

k_g = Koefisien perpindahan massa sisi gas, (kmol/s.m^2.Pa)

P_A= Tekanan parsial gas CO_2, (Pa)

D_{AL} = Koefisien difusi liquid-CO_2, (m^2/det)
He = Konstanta Henry , (Pa.m^3/kmol)
$[CO_2]_e$ = Konsentrasi gas CO_2 berkesetimbangan dalam cairan, (kmol/m^3)

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

Substitusikan pers (a) → (b)

$$\frac{Q}{t} = \left(\frac{k_g P_A + [CO_2]_e \varphi}{k_g H_e + \varphi} - [CO_2]_e\right)\varphi$$

$$= \left(\frac{k_g P_A + [CO_2]_e \varphi - [CO_2]_e\, k_g H_e - [CO_2]_e\, \varphi}{k_g H_e + \varphi}\right)\varphi$$

$$= \left(\frac{k_g P_A - [CO_2]_e\, k_g H_e}{k_g H_e + \varphi}\right)\varphi$$

$$\frac{Q}{t} k_g H_e + \frac{Q}{t}\varphi = k_g P_A \varphi - [CO_2]_e k_g H_e\, \varphi$$

$$\varphi = \frac{\frac{Q}{t} k_g H_e}{k_g P_A - [CO_2]_e k_g H_e - \frac{Q}{t}}$$

$$\varphi = \left(\frac{1.572 \times 10^{-5} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2\text{s}} \times 3.2577 \times 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2\text{s. Pa}} \times 3.47 \times 10^{6} \frac{\text{m}^3\text{Pa}}{\text{kmol}}}{3.2577 \times 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2\text{s. Pa}} \times 40530 \text{ Pa} - 9.205 \times 10^{-6} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \times 3.2577 \times 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2\text{s. Pa}} \times 3.47 \times 10^{6} \frac{\text{m}^3\text{Pa}}{\text{kmol}} - 1.572 \times 10^{-5} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2\text{s}}}\right)$$

$$\varphi = 1.53 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

Maka nilai *Kov* diperoleh dengan persamaan :

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

$$1.53 \times 10^{-3} \text{ m/s} = \sqrt{2.31 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times k_{ov}}$$

$$k_{ov} = 1014.148724 \left(\frac{1}{\text{s}}\right)$$

***Menentukan Apparent Reaction Rate Constant* (k_{app})**

Menentukan k_{app} dengan terlebih dahulu menentukan k_{MDEA} dan $k_{[OH-]}$. k_{MDEA} ditentukan menggunakan persamaan (Ko dan Li, 2000):

$$k_{MDEA} = 4.01 \times 10^{8} \exp\left(\frac{-5400}{T}\right)$$

k_{MDEA} = 4.01 x 10^8 exp $(\frac{-5400}{303.15\ \mathrm{K}})$

k_{MDEA} =7.363299294 $\mathrm{m^3/kmol.det}$

Selanjutnya menentukan $k_{[OH-]}$ menggunakan persamaan (Danckwerts, 1970) :

$$\log_{10} k_{OH^-} = 13.635 - \frac{2895}{T}$$

$$\log_{10} k_{OH^-} = 13.635 - \frac{2895}{303.15\ \mathrm{K}}$$

$$k_{OH^-} = 12169.4834\ \mathrm{m^3/kmol.det}$$

Dari K_{MDEA} dan $K_{[OH-]}$, dapat menentukan K_{app} menggunakan persamaan :

$k_{app} = k_{ov} - k_{OH-}[OH^-] - k_{MDEA}$ [MDEA]

k_{app} = 1014.148724 $(\frac{1}{s})$ – (12169.4834 x 0.0001711)- $(7.363299294\ x\ 3.50616651 \frac{kmol}{m^3})$

k_{app} = 986.24990 $\mathrm{det^{-1}}$

Pembuktian Regim Reaksi Cepat *Pseudo First Order* :

Kondisi reaksi pada absorpsi CO_2 kedalam larutan MDEA berpromotor umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat pseudo first order dengan ketentuan nilai yaitu 3 < *Ha* < ½ *Ei* (Danckwerts, 1970; Lin dan Shyu, 1999) :

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

Dimana,

k_{ov} = Konstanta laju reaksi overall pseudo first order, $(\mathrm{det^{-1}})$

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

D_{BL} = Diffusivitas MDEA dalam H_2O, $(\mathrm{m^2/det})$

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

C_{BO} = Konsentrasi awal reaktan, $(\mathrm{kmol/\ m^3})$

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

$[CO_2]_i$ = Konsentrasi gas CO_2 dalam *interface*, $(\mathrm{kmol/m^3})$

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

$$Ha = \frac{\sqrt{1014.148724\left(\frac{1}{s}\right) \text{ x } 2.31058 \text{ x } 10^{-9}\ m^2/s}}{1.02795 \text{ x } 10^{-4}\ m/s}$$

$$Ha = 14.89153918$$

Sehingga didapatkan C_{Ai} :

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

$$C_{Ai} = \frac{3.258 \text{ x } 10^{-9}\frac{kmol}{s.\,m^2 P_a} \text{x } 40530 P_a + 9.205 \text{ x } 10^{-6}\sqrt{2.31058 \text{ x } 10^{-9}\frac{m^2}{s} \text{x} 1014.1487\ (\frac{1}{s})}}{3.258 \text{ x } 10^{-9}\frac{kmol}{s.\,m^2 P_a} \text{x } 3.47 \text{ x} 10^6 \frac{m^3 Pa}{kmol} + \sqrt{2.31058 \text{ x } 10^{-9}\frac{m^2}{s} \text{x} 1014.1487\ (\frac{1}{s})}}$$

$$C_{Ai} = 0.010276164\ kmol/m^3$$

Setelah itu menghitung *Ei* :

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{[R_3N]}{z\,[CO_2]_i}\sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}}$$

$$E_i = \sqrt{\frac{2.31058 \text{ x } 10^{-9}\ m^2/s}{9.52515 \text{ x } 10^{-10}\ m^2/s}} + \frac{3.5062\ kmol/m^3}{1.02762 \text{ x } 10^{-2}\ kmol/m^3}\sqrt{\frac{9.52515 \text{ x } 10^{-10}\ m^2/s}{2.31058 \text{ x } 10^{-9}\ m^2/s}}$$

$$E_i = 220.624406$$

Sehingga $0.5E_i = 0.5 \text{ x } 220.624406$

$$0.5E_i = 110.3122028$$

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

Menentukan Persamaan Konstanta Laju Reaksi untuk Glycine dan L-Glutamic Acid pada suhu 303.15 K

Dalam menentukan persamaan konstanta laju reaksi untuk *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* pada suhu 303.15 K menggunakan persamaan:

$$y' = b_1 x_1 + b_2 x_2$$

Dimana :

y' = k*appereance* prediksi tiap variabel suhu

x_1 = Konsentrasi *Glycine* dalam campuran (kmol/m^3)

x_2 = Konsentrasi *L-Glutamic Acid* dalam campuran (kmol/m^3)

b_1 = $k_{Glycine}$; b_2 = $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$

Menentukan b_1 dan b_2 menggunakan persamaan :

$$\Sigma\, yx_1 = b_1\, \Sigma\, {x_1}^2 + b_2\, \Sigma x_1 x_2 \qquad \text{(A.1)}$$

$$\Sigma\, yx_2 = b_1\, \Sigma\, x_1 x_2 + b_2\, \Sigma\, {x_2}^2 \qquad \text{(A.2)}$$

Tabel A. 2 Data Perhitungan *Kapp* Prediksi Untuk Suhu 303.15 K

Variabel	x_1 (kmol/m^3)	x_2 (kmol/m^3)	y	x_1^2	x_2^2	x_1x_2	yx_1	yx_2
2% 1:1	0.141	0.072	986	0.020	0.005	0.010	138.7	70.7
2% 1: 2	0.092	0.094	124	0.008	0.009	0.009	11.5	11.7
2% 2:1	0.186	0.047	373	0.035	0.002	0.009	69.4	17.7
2% 0:1	0	0.142	507	0	0.020	0	0	71.9
2% 1:0	0.278	0	734	0.077	0	0	204.4	0
4% 1:1	0.282	0.144	5952	0.080	0.021	0.041	1681	857.7
4% 1:2	0.186	0.190	11109	0.035	0.036	0.035	2071.9	2114.2
4% 2:1	0.372	0.095	988	0.138	0.009	0.035	367.3	93.7
4% 0:1	0	0.285	11786	0	0.081	0	0	3358
4% 1:0	0.557	0	28504	0.310	0	0	15871.3	0
TOTAL				0.703	0.183	0.139	20415.4	6595.6

Dari persamaan (A.1) dan persamaan (A.2) dilakukan subtitusi dan eliminasi :

$20415.5 = 0.7032398b_1 + 0.13904b_2$ **I** x 0.18349

$6595.6 = 0.1390394b_1 + 0.18349b_2$ **I** x 0.13904

Sehingga menjadi :

$3746.13 = 0.1290407b_1 + 0.02551b_2$

$917.05 = 0.0193319b_1 + 0.02551b_2$ _

$2829.1 = 0.1097088b_1$

$b_1 = 25787.1$

Subtitusi b_1 ke persamaan :

$$20415.5 = 0.7032398 b_1 + 0.13904 b_2$$

$$20415.5 = 0.7032398\ x\ (25787.1) + 0.13904 b_2$$

$$b_2 = 16404.8$$

Diperoleh rumus *Kapp* prediksi untuk suhu 303.15 K :

$$y = b_1 x_1 + b_2 x_2$$

$$kapp \text{ prediksi } = 25787.1 x_1 + 16404.8 x_2$$

Dimana $k_{Glycine}$ sebesar 25787.14 dan $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ sebesar 16404.77

Menentukan persamaan konstanta kecepatan reaksi* $k_{Glycine}$ *dan* $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ *:

Harga $k_{Glycine}$ dan $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ diperoleh dengan melakukan perhitungan K_{app} Prediksi untuk sistem campuran pada temperatur (303.15 K – 323.15 K)

Tabel A. 3 Data $k_{Glycine}$ untuk Sistem Campuran Pada Setiap Suhu

Suhu (K)	$k_{Glycine}$	Y	X
		ln $k_{Glycine}$	1/*T* (1/K)
303.15	25787.14	10.16	0.003299
313.15	82112.38	11.32	0.003193
323.15	276015.01	12.53	0.003095

Tabel A. 4 Data $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ untuk Sistem Campuran Pada Setiap Suhu

Suhu (K)	$k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$	Y	X
		ln $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$	1/*T* (1/K)
303.15	16404.77	9.71	0.003299
313.15	151631.74	11.93	0.003193
323.15	390646.03	12.88	0.003095

Nilai Y dan X dari **Tabel A.3** dan **Tabel A.4** digunakan pada program aplikasi *Analisys Toolpak –VBA* pada *Microsoft Excel* sehingga didapatkan:

- $K_{Glycine}$ dalam sistem *MDEA-Glycine-L-Glutamic Acid* :
  ln *A* = 48.41699

E/R = -11604.7

$k_{Glycine}$ = 1.06 x 10^{21} exp (-11604.7/*T*)

- $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ dalam sistem *MDEA-Glycine-L-Glutamic Acid* :

ln *A* = 42.51041

E/R = -9576.5

$k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ = 2.90 x 10^{18} exp (-9576.5/*T*)

Pada sistem murni persamaan umum regresi linear yang digunakan untuk perhitungan k_{app} prediksi adalah sebagai berikut:

$$y' = \frac{\sum xy}{\sum x^2}$$

Dimana :

y = k_{app} eksperimen;

y' = k_{app} prediksi atau k promotor

x = konsentrasi promotor (kmol/m^3)

$$k\ \text{gly} = \frac{\sum xy}{\sum x^2}$$

$$kapp\ prediksi = k\ gly\ \times [Glycine]$$

$$k\ \text{Glu} = \frac{\sum xy}{\sum x^2}$$

$$kapp\ prediksi = k\ Glu\ \times [Glu]$$

Tabel A. 5 Data Perhitungan *Kapp* Prediksi Untuk Promotor *Glycine* Pada Sistem Murni Untuk Suhu 303.15 K

Variabel	[gly] (kmol/m^3) (x)	kapp *(y)*	*xy*	x^2	*k gly*	kapp prediksi
2% 1:0	0.29	734	204	0.078	41485	11546
4% 1:0	0.56	28504	15871	0.310	41485	23099
TOTAL			16075	0.387		

Tabel A. 6 Data Perhitungan *Kapp* Prediksi Untuk Promotor *L-Glutamic Acid* Pada Sistem Murni Untuk Suhu 303.15 K

Variabel	[glu] (kmol/m^3) (x)	kapp *(y)*	*xy*	x^2	*k glu*	kapp prediksi
2% 1:0	0.14	507	72	0.02	33864.4	4802
4% 1:0	0.28	11786	3358	0.08	33864.4	9649
TOTAL			3430	0.101		

Harga $k_{Glycine}$ dan $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ diperoleh dengan melakukan perhitungan K_{app} Prediksi untuk sistem murni pada temperatur (303.15 K – 323.15 K)

Tabel A. 7 Data $k_{Glycine}$ untuk Sistem Murni Pada Setiap Suhu

Suhu (K)	$k_{Glycine}$	Y $\ln k_{Glycine}$	X $1/T$ (1/K)
303.15	41484.9963	10.6331	0.003299
313.15	153697.4700	11.9427	0.003193
323.15	431399.84	12.9748	0.003095

Tabel A. 8 Data $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ untuk Sistem Murni Pada Setiap Suhu

Suhu (K)	$k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$	Y $\ln k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$	X $1/T$ (1/K)
303.15	33864.3895	10.4301	0.003299
313.15	287814.3371	12.5701	0.003193
323.15	635793.5825	13.3626	0.003095

Nilai Y dan X dari **Tabel A.7** dan **Tabel A.8** digunakan pada program aplikasi *Analisys Toolpak –VBA* pada *Microsoft Excel* sehingga didapatkan:

- $k_{Glycine}$ dalam sistem *MDEA-Glycine* :
  $\ln A = 45.29341$
  $E/R = -10443.8$
  $K_{Glycine} = 4.68 \times 10^{19} \exp(-10443.8/T)$

- $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid}$ dalam sistem *MDEA-L-Glutamic Acid* :
  ln *A* = 38.18159
  E/R = -8020.2
  $k_{L\text{-}Glutamic\ Acid} = 3.82 \times 10^{15} \exp(-8020.2/T)$

Menentukan Persamaan Konstanta Laju Reaksi untuk MDEA pada suhu 303.15 K

Dalam menentukan persamaan konstanta laju reaksi untuk MDEA pada suhu 303.15 K menggunakan persamaan :

$$k_{MDEA} = \frac{k_{ov}}{[\text{MDEA}]}$$

$$k_{MDEA} = \frac{56.5582\ (\frac{1}{s})}{3.4611\ \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}}$$

$$k_{MDEA} = 16.3410\ \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}\ s}$$

Tabel A. 9 Data k_{MDEA} Setiap Suhu

Suhu (K)	k_{MDEA}	Y ln k_{MDEA}	X 1/*T* (1/K)
303.15	16.3410	2.7937	0.003299
313.15	223.5156	5.4095	0.003193
323.15	963.3830	6.8705	0.003095

Nilai Y dan X dari **Tabel A.9** digunakan pada program aplikasi *Analisys Toolpak –VBA* pada *Microsoft Excel* sehingga didapatkan:

ln *A* = 52.6207
E/R = -14784.199
$k_{MDEA} = 7.13 \times 10^{22} \exp(-14784.199/T)$

APPENDIKS B

B.1 Hasil Analisa Menggunakan *CO_2-Analysis Method*

Tabel B.1 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:1

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	[CO_2] awal (mol/L)	[CO_2] akhir (mol/L)	[CO_3^{2-}] akhir (mol/L)	[HCO_3^-] akhir (mol/L)
303.15	0.1193	24.75	23.25	0.0626	0.0805	0.0303	0.0502
313.15	0.1193	24.75	21.75	0.0626	0.0984	0.0271	0.0714
323.15	0.1193	24.75	19.5	0.0626	0.1253	0.0224	0.1028

Tabel B.2 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:2

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	[CO_2] awal (mol/L)	[CO_2] akhir (mol/L)	[CO_3^{2-}] akhir (mol/L)	[HCO_3^-] akhir (mol/L)
303.15	0.1055	30	29.25	0	0.0079	0.0068	0.0011
313.15	0.1055	30	28.5	0	0.0158	0.0111	0.0047
323.15	0.1055	30	27.375	0	0.0277	0.0137	0.0140

Tabel B.3 Data Perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	$[CO_2]$ awal (mol/L)	$[CO_2]$ akhir (mol/L)	$[CO_3^{2-}]$ akhir (mol/L)	$[HCO_3^-]$ akhir (mol/L)
303.15	0.1055	29.25	28.125	0.0079	0.0198	0.0141	0.0057
313.15	0.1055	29.25	27.375	0.0079	0.0277	0.0159	0.0118
323.15	0.1055	29.25	24.75	0.0079	0.0554	0.0183	0.0371

Tabel B.4 Data Perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	$[CO_2]$ awal (mol/L)	$[CO_2]$ akhir (mol/L)	$[CO_3^{2-}]$ akhir (mol/L)	$[HCO_3^-]$ akhir (mol/L)
303.15	0.1193	22.5	21.375	0.0895	0.1029	0.0330	0.0699
313.15	0.1193	22.5	18.75	0.0895	0.1342	0.0292	0.1051
323.15	0.1193	22.5	18	0.0895	0.1432	0.0229	0.1203

Tabel B.5 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	[CO_2] awal (mol/L)	[CO_2] akhir (mol/L)	[CO_3^{2-}] akhir (mol/L)	[HCO_3^-] akhir (mol/L)
303.15	0.1055	29.25	27.75	0.0079	0.0237	0.0160	0.0078
313.15	0.1055	29.25	27	0.0079	0.0317	0.0171	0.0145
323.15	0.1055	29.25	22.5	0.0079	0.0791	0.0203	0.0588

Tabel B.6 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:1

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	[CO_2] awal (mol/L)	[CO_2] akhir (mol/L)	[CO_3^{2-}] akhir (mol/L)	[HCO_3^-] akhir (mol/L)
303.15	0.1237	24.75	21.75	0.0650	0.1021	0.0333	0.0688
313.15	0.1237	24.75	21	0.0650	0.1114	0.0283	0.0831
323.15	0.1237	24.75	18.75	0.0650	0.1392	0.0231	0.1161

Tabel B.7 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:2

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	[CO_2] awal (mol/L)	[CO_2] akhir (mol/L)	[CO_3^{2-}] akhir (mol/L)	[HCO_3^-] akhir (mol/L)
303.15	0.1237	22.5	18.75	0.0928	0.1392	0.0362	0.1030
313.15	0.1237	22.5	18	0.0928	0.1485	0.0299	0.1186
323.15	0.1237	22.5	16.5	0.0928	0.1671	0.0236	0.1435

Tabel B.8 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	[CO_2] awal (mol/L)	[CO_2] akhir (mol/L)	[CO_3^{2-}] akhir (mol/L)	[HCO_3^-] akhir (mol/L)
303.15	0.1193	23.25	21.75	0.0805	0.0984	0.0326	0.0658
313.15	0.1193	23.25	18.75	0.0805	0.1342	0.0292	0.1050
323.15	0.1193	23.25	18	0.0805	0.1432	0.0230	0.1202

Tabel B.9 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	[CO_2] awal (mol/L)	[CO_2] akhir (mol/L)	[CO_3^{2-}] akhir (mol/L)	[HCO_3^-] akhir (mol/L)
303.15	0.1055	30	25.5	0	0.0475	0.0241	0.0234
313.15	0.1055	30	22.5	0	0.0791	0.0254	0.0537
323.15	0.1055	30	21.75	0	0.0870	0.0209	0.0662

Tabel B.10 Data Perhitungan [CO_3^{2-}] dan [HCO_3^-] pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	[CO_2] awal (mol/L)	[CO_2] akhir (mol/L)	[CO_3^{2-}] akhir (mol/L)	[HCO_3^-] akhir (mol/L)
303.15	0.1193	24	18.75	0.0716	0.1342	0.0357	0.0985
313.15	0.1193	24	17.25	0.0716	0.1521	0.0300	0.1222
323.15	0.1193	24	16.5	0.0716	0.1611	0.0234	0.1377

Tabel B.11 Data Perhitungan $[CO_3^{2-}]$ dan $[HCO_3^-]$ pada MDEA 40% berat

T (K)	Molar NaOH (M)	Vol NaOH Sampel Awal (ml)	Vol NaOH Sampel Akhir (ml)	$[CO_2]$ awal (mol/L)	$[CO_2]$ akhir (mol/L)	$[CO_3^{2-}]$ akhir (mol/L)	$[HCO_3^-]$ akhir (mol/L)
303.15	0.1237	19.125	18.75	0.1346	0.1392	0.0357	0.1035
313.15	0.1237	19.125	18	0.1346	0.1485	0.0295	0.1190
323.15	0.1237	19.125	17.25	0.1346	0.1578	0.0230	0.1347

B.2 Hasil Perhitungan $[OH^-]$ dan $[CO_2^-]e$

Tabel B.12 Data Perhitungan $[OH^-]$ dan $[CO_2^-]e$ pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:1

T (K)	Kw	K1	K2	K3	K4	$[OH^-]$	$[CO_2^-]e$
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.70×10^{8}	1.71×10^{-4}	9.20×10^{-6}
313.15	2.89×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^{8}	1.82×10^{-4}	2.26×10^{-5}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^{8}	1.75×10^{-4}	6.08×10^{-5}

Tabel B.13 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:2

T (K)	Kw	K1	K2	K3	K4	[OH^-]	[CO_2^-]e
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.70×10^{8}	1.73×10^{-3}	2.02×10^{-8}
313.15	2.89×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^{8}	1.12×10^{-3}	2.42×10^{-7}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^{8}	7.84×10^{-4}	1.84×10^{-6}

Tabel B.14 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1

T (K)	Kw	K1	K2	K3	K4	[OH^-]	[CO_2^-]e
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.70×10^{8}	6.98×10^{-4}	2.56×10^{-7}
313.15	2.89×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^{8}	6.49×10^{-4}	1.05×10^{-6}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^{8}	3.96×10^{-4}	9.66×10^{-6}

Tabel B.15 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1

T (K)	Kw	K1	K2	K3	K4	[OH^-]	[CO_2^-]e
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.70×10^{8}	1.34×10^{-4}	1.64×10^{-5}
313.15	2.89×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^{8}	1.33×10^{-4}	4.53×10^{-5}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^{8}	1.53×10^{-4}	8.13×10^{-5}

Tabel B.16 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 2% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0

T (K)	Kw	K1	K2	K3	K4	[OH^-]	[CO_2^-]e
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.70×10^{8}	5.80×10^{-4}	4.21×10^{-7}
313.15	2.89×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^{8}	5.66×10^{-4}	1.48×10^{-6}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^{8}	2.76×10^{-4}	2.20×10^{-5}

Tabel B.17 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:1

T (K)	Kw	K1	K2	K3	K4	[OH^-]	[CO_2^-]e
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.70×10^{8}	1.37×10^{-4}	1.58×10^{-5}
313.15	2.89×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^{8}	1.63×10^{-4}	2.93×10^{-5}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^{8}	1.59×10^{-4}	7.51×10^{-5}

Tabel B.18 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor Glycine dan L-Glutamic Acid 1:2

T (K)	Kw	K1	K2	K3	K4	[OH^-]	[CO_2^-]e
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.70×10^{8}	0.99×10^{-4}	3.25×10^{-5}
313.15	2.89×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^{8}	1.21×10^{-4}	5.62×10^{-5}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^{8}	1.32×10^{-4}	1.12×10^{-4}

Tabel B.19 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 2:1

T (K)	Kw	K1	K2	K3	K4	[OH^-]	[CO_2^-]e
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.70×10^{8}	1.40×10^{-4}	1.47×10^{-5}
313.15	2.89×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^{8}	1.34×10^{-4}	4.51×10^{-5}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^{8}	1.53×10^{-4}	8.10×10^{-5}

Tabel B.20 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 0:1

T (K)	Kw	K1	K2	K3	K4	[OH^-]	[CO_2^-]e
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.70×10^{8}	2.91×10^{-4}	2.52×10^{-6}
313.15	2.89×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^{8}	2.27×10^{-4}	1.36×10^{-5}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^{8}	2.52×10^{-4}	2.71×10^{-5}

Tabel B.21 Data Perhitungan [OH^-] dan [CO_2^-]e pada konsentrasi 4% berat dengan komposisi promotor *Glycine* dan *L-Glutamic Acid* 1:0

T (K)	Kw	K1	K2	K3	K4	[OH^-]	[CO_2^-]e
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.70×10^{8}	1.03×10^{-4}	3.01×10^{-5}
313.15	2.89×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^{8}	1.18×10^{-4}	5.96×10^{-5}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^{8}	1.36×10^{-4}	1.05×10^{-4}

Tabel B.22 Data Perhitungan $[OH^-]$ dan $[CO_2^-]e$ pada MDEA 40% berat

T (K)	Kw	K1	K2	K3	K4	$[OH^-]$	$[CO_2^-]e$
303.15	1.45×10^{-14}	4.63×10^{-7}	5.13×10^{-11}	125.32	2.70×10^{8}	0.98×10^{-4}	3.32×10^{-5}
313.15	2.89×10^{-14}	5.02×10^{-7}	6.01×10^{-11}	88.88	1.77×10^{8}	1.19×10^{-4}	5.74×10^{-5}
323.15	5.38×10^{-14}	5.22×10^{-7}	6.73×10^{-11}	60.48	1.16×10^{8}	1.37×10^{-4}	1.02×10^{-4}

B.3 Nilai Konstanta Henry

Tabel B.23 Data Perhitungan Konstanta Henry Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 K – 323.15 K

T(K)	(-d ln Kh / d(1/T))	((1/T)-(1/298))	EXP((-d ln Kh / d(1/T)) x ((1/T)-(1/298))	He_{298} (kmol/m^3.pa)	1/He˚t (mol/cm^3.Pa)	He˚t (m^3.Pa/kmol)
303.15	2400	-5.70×10^{-5}	0.872128555	3.30×10^{-7}	2.88×10^{-7}	3.47×10^{6}
313.15	2400	-1.62×10^{-4}	0.677305727	3.30×10^{-7}	2.24×10^{-7}	4.47×10^{6}
323.15	2400	-2.61×10^{-4}	0.534298964	3.30×10^{-7}	1.76×10^{-7}	5.67×10^{6}

B.4 Hasil Perhitungan Diffusivitas

Tabel B.24 Hasil Perhitungan Diffusivitas Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 – 323.15 K

T (K)	$DA_L(CO_2\text{-}H_2O)$ (m^2/s)	$DAg(CO_2\text{-}N_2)$ (m^2/s)	$DB_L(MDEA\text{-}H_2O)$ (m^2/s)
303.15	2.311×10^{-9}	1.719×10^{-5}	9.525×10^{-10}
313.15	2.913×10^{-9}	1.820×10^{-5}	1.201×10^{-9}
323.15	3.590×10^{-9}	1.923×10^{-5}	1.480×10^{-9}

B.5 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa

Tabel B.25 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Sisi Gas Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 - 323.15 K

T (K)	Sc	Re	Sh	k_g ($kmol/s.m^2.Pa$)
303.15	0.794965814	716.93905	44.412569	3.2577×10^{-9}
313.15	0.799241365	673.73136	42.3194306	3.18066×10^{-9}
323.15	0.80310107	634.60569	40.3861865	3.10777×10^{-9}

Tabel B.26 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 1:1

T (K)	δ (m)	V max (m/s)	k_L (m/s)
303.15	3.67 x10^{-4}	0.3339	1.0279 x 10^{-4}
313.15	3.54 x10^{-4}	0.3458	1.1747 x 10^{-4}
323.15	3.40 x10^{-4}	0.3603	1.3309 x 10^{-4}

Tabel B.27 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 1:2

T (K)	δ (m)	V max (m/s)	k_L (m/s)
303.15	3.76 x10^{-4}	0.3259	1.0157 x 10^{-4}
313.15	3.49 x10^{-4}	0.3505	1.1826 x 10^{-4}
323.15	3.47 x10^{-4}	0.3532	1.3178 x 10^{-4}

Tabel B.28 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 2:1

T (K)	δ (m)	V max (m/s)	k_L (m/s)
303.15	3.74 x10^{-4}	0.3273	1.0179 x 10^{-4}
313.15	3.47 x10^{-4}	0.3526	1.1862 x 10^{-4}
323.15	3.45 x10^{-4}	0.3554	1.3218 x 10^{-4}

Tabel B.29 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 0:1

T (K)	δ (m)	V max (m/s)	k_L (m/s)
303.15	3.79×10^{-4}	0.3229	1.0109×10^{-4}
313.15	3.50×10^{-4}	0.3502	1.1821×10^{-4}
323.15	3.46×10^{-4}	0.3535	1.3185×10^{-4}

Tabel B.30 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 1:0

T (K)	δ (m)	V max (m/s)	k_L (m/s)
303.15	4.07×10^{-4}	0.3009	9.7592×10^{-5}
313.15	3.26×10^{-4}	0.3756	1.2243×10^{-4}
323.15	3.14×10^{-4}	0.3897	1.3842×10^{-4}

Tabel B.31 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 1:1

T (K)	δ (m)	V max (m/s)	k_L (m/s)
303.15	3.859×10^{-4}	0.3174	1.0023×10^{-4}
313.15	3.728×10^{-4}	0.3285	1.1450×10^{-4}
323.15	3.726×10^{-4}	0.3287	1.2714×10^{-4}

Tabel B.32 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 1:2

T (K)	δ (m)	V max (m/s)	k_L (m/s)
303.15	4.045×10^{-4}	0.3028	9.7892×10^{-5}
313.15	3.836×10^{-4}	0.3193	1.1288×10^{-5}
323.15	3.835×10^{-4}	0.3194	1.2531×10^{-4}

Tabel B.33 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 2:1

T (K)	δ (m)	V max (m/s)	k_L (m/s)
303.15	4.14×10^{-4}	0.2962	9.6822×10^{-5}
313.15	3.95×10^{-4}	0.3104	1.1129×10^{-4}
323.15	3.74×10^{-4}	0.3274	1.2688×10^{-4}

Tabel B.34 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 0:1

T (K)	δ (m)	V max (m/s)	k_L (m/s)
303.15	4.15×10^{-4}	0.2949	9.6605×10^{-5}
313.15	3.98×10^{-4}	0.3079	1.1085×10^{-4}
323.15	3.89×10^{-4}	0.3149	1.2444×10^{-4}

Tabel B.35 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 1:0

T (K)	δ (m)	V max (m/s)	k_L (m/s)
303.15	3.992×10^{-4}	0.3069	9.8548×10^{-5}
313.15	3.781×10^{-4}	0.3239	1.1369×10^{-4}
323.15	3.777×10^{-4}	0.3243	1.2627×10^{-4}

Tabel B.36 Hasil Perhitungan Perpindahan Massa Sisi Liquid pada Temperatur 303.15-323.15 K untuk 40% berat MDEA

T (K)	δ (m)	V max (m/s)	k_L (m/s)
303.15	4.35×10^{-4}	0.2814	9.4371×10^{-5}
313.15	3.52×10^{-4}	0.3485	1.1792×10^{-4}
323.15	3.47×10^{-4}	0.3532	1.3178×10^{-4}

B.6 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan K_{ov} (1/s)

Tabel B.37 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 1:1

T (K)	φ (m/s)	K_{ov} (1/s)
303.15	1.53×10^{-3}	1014.15
313.15	4.60×10^{-3}	7275.48
323.15	1.39×10^{-2}	53628.71

Tabel B.38 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 1:2

T (K)	φ (m/s)	K_{ov} (1/s)
303.15	0.63×10^{-3}	171.10
313.15	1.72×10^{-3}	1014.81
323.15	4.22×10^{-3}	4957.97

Tabel B.39 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 2:1

T (K)	φ (m/s)	K_{ov} (1/s)
303.15	0.97 x10^{-3}	407.30
313.15	2.22 x10^{-3}	1686.31
323.15	8.74 x10^{-3}	21268.80

Tabel B.40 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 0:1

T (K)	φ (m/s)	K_{ov} (1/s)
303.15	1.11 x10^{-3}	534.48
313.15	6.28 x10^{-3}	13554.85
323.15	1.07 x10^{-2}	32136.09

Tabel B.41 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 2% berat promotor komposisi 1:0

T (K)	φ (m/s)	K_{ov} (1/s)
303.15	1.33 x10^{-3}	767.34
313.15	2.75 x10^{-3}	2587.24
323.15	1.75 x10^{-2}	85175.84

Tabel B.42 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 1:1

T (K)	φ (m/s)	K_{ov} (1/s)
303.15	3.72 x10^{-3}	5980.32
313.15	6.61 x10^{-3}	14987.98
323.15	1.93 x10^{-2}	104113.12

Tabel B.43 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 1:2

T (K)	φ (m/s)	K_{ov} (1/s)
303.15	5.07 x10^{-3}	11136.79
313.15	8.78 x10^{-3}	26482.43
323.15	1.95 x10^{-2}	106457.06

Tabel B.44 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 2:1

T (K)	φ (m/s)	K_{ov} (1/s)
303.15	1.53 x10^{-3}	1015.24
313.15	8.27 x10^{-3}	23482.30
323.15	1.39 x10^{-2}	54179.32

Tabel B.45 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 0:1

T (K)	φ (m/s)	K_{ov} (1/s)
303.15	5.22 x10^{-3}	11815.19
313.15	1.67 x10^{-2}	95642.05
323.15	2.75 x10^{-2}	210151.05

Tabel B.46 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 4% berat promotor komposisi 1:0

T (K)	φ (m/s)	K_{ov} (1/s)
303.15	8.12 x10^{-3}	28530.86
313.15	1.76 x10^{-2}	105748.62
323.15	3.04 x10^{-2}	257780.81

Tabel B.47 Hasil Perhitungan φ (m/s) dan Kov (1/s) pada Temperatur 303.15 K - 323.15 K untuk 40% berat MDEA

T (K)	φ (m/s)	K_{ov} (1/s)
303.15	0.36 x10^{-3}	56.56
313.15	1.50 x10^{-3}	773.61
323.15	3.46 x10^{-3}	3334.38

B.7 Hasil Perhitungan k_{MDEA}, $k_{[OH-]}$ dan kapp

Tabel B.48 Hasil Perhitungan k_{MDEA} dan $k_{[OH-]}$ pada Temperatur 303.15 - 323.15 K

T (K)	k_{MDEA}	$k_{[OH-]}$
303.15	7.3633	12169.483
313.15	13.0051	24560.043
323.15	22.1750	47458.290

Tabel B.49 Hasil Perhitungan $k_{apperence}$ konsentrasi 2% berat promotor pada Temperatur 303.15 - 323.15 K

T (K)	$k_{appereance}$				
	1:1	**1:2**	**2:1**	**0:1**	**1:0**
303.15	986.250	124.432	372.930	507.067	734.468
313.15	7225.406	941.922	1624.666	13506.030	2527.752
323.15	53542.675	4843.587	21172.090	32051.197	85085.011

Tabel B.50 Hasil Perhitungan $k_{apperence}$ konsentrasi 4% berat promotor pada Temperatur 303.15 - 323.15 K

T (K)	$k_{appereance}$				
	1:1	**1:2**	**2:1**	**0:1**	**1:0**
303.15	5952.457	11109.629	987.652	11785.740	28503.778
313.15	14937.690	26433.616	23433.306	95590.718	105700.106
323.15	104026.651	106372.660	54094.126	210061.085	257696.577

B.8 Hasil Perhitungan Rezim

Untuk *pseudo first order*, nilai Ha harus berada pada range 3 < Ha < 0.5 Ei Contoh perhitungan rezim konsentrasi 2% berat promotor komposisi 1:1 pada temperatur 303.15 K

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

Data-data : K_{ov} = 1014.149 (s^{-1}); D_{AL} = 2.31*10^{-9} m^2/s ; K_L = 0.000103 m/s

$$Ha = \frac{\sqrt{1014.109\ x\ 2.31\ x\ 10^{-9}}}{0.000103} = 14.8915$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{C_{B0}}{z\,[C_A]_i}\sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}}$$

Data-data : D_{AL} = 2.31*10^{-9} m^2/s; D_{BL} = 9.52*10^{-10} m^2/s;

C_{B0} = 3.506 kmol/m^3; z = 1; $[C_A]_i$ = 0.0103 kmol/m^3

$$E_i = \sqrt{\frac{2.31 \text{ x } 10^{-9}}{9.52 \text{ x } 10^{-10}}} + \frac{3.506}{1\ x\ 0.0103}\sqrt{\frac{9.52 \text{ x } 10^{-10}}{2.31 \text{ x } 10^{-9}}} = 220.6244$$

Ei = 220.6244/2 = 110.3122

Nilai Ha memenuhi pertidaksamaan 3 < 14.8915 < 110.3122, maka dapat disimpulkan bahwa rezim merupakan *pseudo first order*.

Tabel B.51 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 2% berat promotor komposisi 1:1 pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	Ha	Cai (kmol/m^3)	Ei	0.5 Ei
303.15	14.8915	0.01028	220.6244	110.3122
313.15	39.1903	0.00685	330.1926	165.0963
323.15	104.2483	0.00403	560.8040	280.4020

Tabel B.52 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 2% berat promotor komposisi 1:2 pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	Ha	Cai (kmol/m^3)	Ei	0.5 Ei
303.15	6.1906	0.01105	203.8033	101.9017
313.15	14.5388	0.00808	278.0827	139.0413
323.15	32.0131	0.00577	389.1394	194.5697

Tabel B.53 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 2% berat promotor komposisi 2:1 pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	Ha	Cai (kmol/m^3)	Ei	0.5 Ei
303.15	9.5308	0.01074	211.5870	105.7935
313.15	18.6861	0.00784	289.4452	144.7226
323.15	66.1021	0.00478	473.5425	236.7712

Tabel B.54 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 2% berat promotor komposisi 0:1 pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	Ha	Cai (kmol/m^3)	Ei	0.5 Ei
303.15	10.9926	0.01062	213.2123	106.6062
313.15	53.1613	0.00630	358.5797	179.2899
323.15	81.4614	0.00447	504.4366	252.2183

Tabel B.55 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 2% berat promotor komposisi 1:0 pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	Ha	Cai (kmol/m^3)	Ei	0.5 Ei
303.15	13.6439	0.01044	217.1727	108.5863
313.15	22.4238	0.00759	297.8883	148.9442
323.15	126.3269	0.00360	626.9538	313.4769

Tabel B.56 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 4% berat promotor komposisi 1:1 pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	Ha	Cai (kmol/m^3)	Ei	0.5 Ei
303.15	37.0858	0.00878	261.6127	130.8064
313.15	57.7096	0.00620	370.2954	185.1477
323.15	152.0568	0.00345	664.2389	332.1195

Tabel B.57 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 4% berat promotor komposisi 1:2 pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	Ha	Cai (kmol/m^3)	Ei	0.5 Ei
303.15	51.8193	0.00806	282.1553	141.0776
313.15	77.8130	0.00562	404.0165	202.0082
323.15	155.9997	0.00345	657.9872	328.9936

Tabel B.58 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 4% berat promotor komposisi 2:1 pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	Ha	Cai (kmol/m^3)	Ei	0.5 Ei
303.15	15.8187	0.01028	221.1459	110.5730
313.15	74.3180	0.00575	394.2955	197.1478
323.15	109.9137	0.00403	562.1354	281.0677

Tabel B.59 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 4% berat promotor komposisi 0:1 pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	Ha	Cai (kmol/m^3)	Ei	0.5 Ei
303.15	54.0854	0.00798	284.5459	142.2729
313.15	150.5899	0.00418	542.4056	271.2028
323.15	220.7134	0.00281	805.3949	402.6974

Tabel B.60 Hasil Perhitungan Rezim konsentrasi 4% berat promotor komposisi 1:0 pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	Ha	Cai (kmol/m^3)	Ei	0.5 Ei
303.15	82.3892	0.00680	332.5228	166.2614
313.15	154.3813	0.00409	552.3570	276.1785
323.15	240.8981	0.00269	839.4803	419.7401

Tabel B.61 Hasil Perhitungan Rezim 40% berat MDEA pada Temperatur 303.15 -323.15 K

T (K)	Ha	Cai (kmol/m^3)	Ei	0.5 Ei
303.15	3.8306	0.01130	198.1352	99.0676
313.15	12.7309	0.00820	272.5661	136.2830
323.15	26.2533	0.00599	372.5293	186.2647

APPENDIKS C

C.1 Data Gas *inlet*

- P = 101325 Pa
- V = 0.0001 m^3/det
- R = 8314 m^3. Pa/kmol.K
- To = 303.15 K
- n = 4.02 x 10^{-6} kmol/det

C.2 Data Mol Gas Terabsorb

Tabel C. 1 Data Mol Gas Terabsorb untuk Konsentrasi 2% berat Promotor pada Suhu 303.15 - 323.15 K (kmol/det)

T(K)	2% 1:1	2% 1:2	2% 2:1	2% 0:1	2% 1:0
303.15	5.97 x 10^{-8}	2.64 x 10^{-8}	3.96 x 10^{-8}	4.47 x 10^{-8}	5.28 x 10^{-8}
313.15	1.19 x 10^{-7}	5.28 x 10^{-8}	6.59 x 10^{-8}	1.49 x 10^{-7}	7.91 x 10^{-8}
323.15	2.09 x 10^{-7}	9.23 x 10^{-8}	1.58 x 10^{-7}	1.79 x 10^{-7}	2.37 x 10^{-7}

Tabel C. 2 Data Mol Gas Terabsorb untuk Konsentrasi 4% berat Promotor pada Suhu 303.15 - 323.15 K (kmol/det)

T(K)	4% 1:1	4% 1:2	4% 2:1	4% 0:1	4% 1:0
303.15	1.24×10^{-7}	1.55×10^{-7}	5.97×10^{-8}	1.58×10^{-7}	2.09×10^{-7}
313.15	1.55×10^{-7}	1.86×10^{-7}	1.79×10^{-7}	2.64×10^{-7}	2.68×10^{-7}
323.15	2.47×10^{-7}	2.47×10^{-7}	2.09×10^{-7}	2.90×10^{-7}	2.98×10^{-7}

Tabel C. 3 Data Mol Gas Terabsorb untuk MDEA pada suhu 303.15 - 323.15 K (kmol/det)

T(K)	MDEA (kmol/det)
303.15	1.55×10^{-8}
313.15	4.64×10^{-8}
323.15	7.73×10^{-8}

C.3 Data % Recovery

Tabel C. 4 %Recovery CO_2 untuk Konsentrasi 2% berat promotor pada suhu 303.15 - 323.15 K

T(K)	2% 1:1	2% 1:2	2% 2:1	2% 0:1	2% 1:0
303.15	1.48	0.66	0.98	1.11	1.31
313.15	2.97	1.31	1.64	3.71	1.97
323.15	5.19	2.30	3.94	4.45	5.91

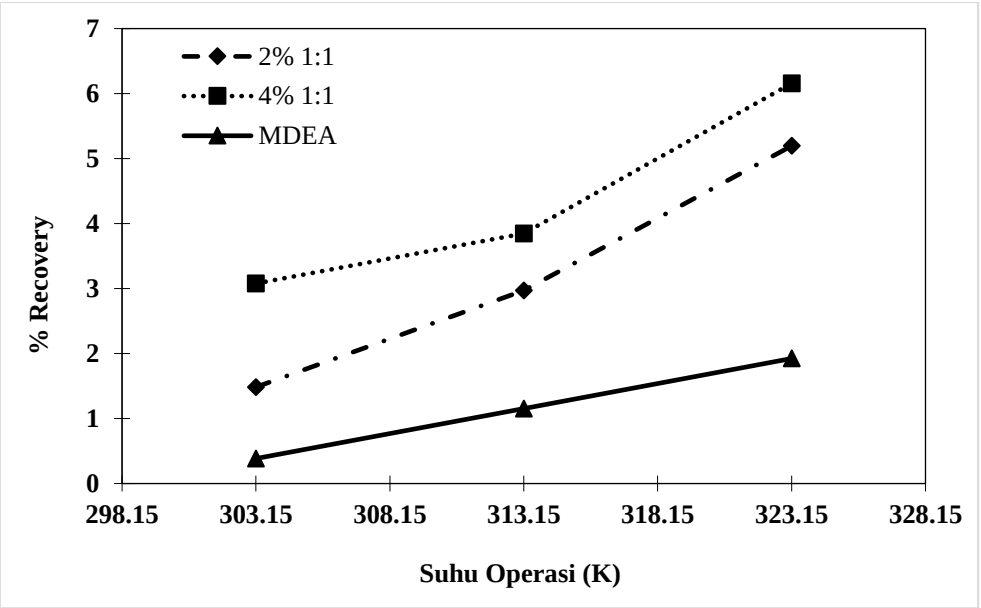
Tabel C. 5 %Recovery CO_2 untuk Konsentrasi 4% berat promotor pada suhu 303.15 - 323.15 K

T(K)	4% 1:1	4% 1:2	4% 2:1	4% 0:1	4% 1:0
303.15	3.08	3.85	1.48	3.94	5.19
313.15	3.85	4.62	4.45	6.56	6.68
323.15	6.16	6.16	5.19	7.22	7.42

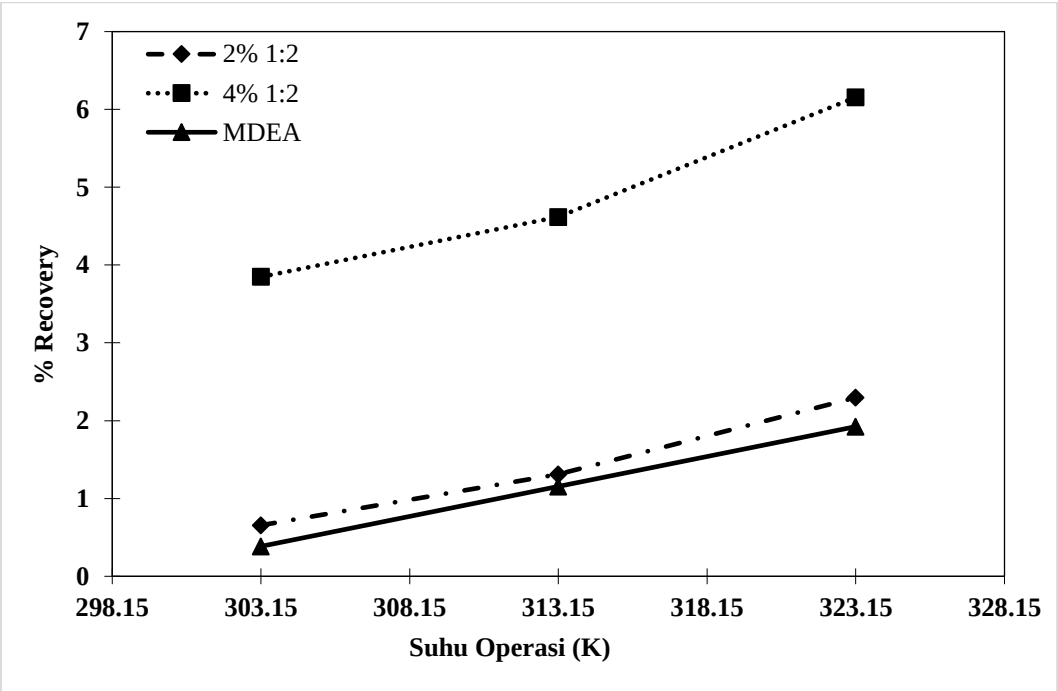
Tabel C. 6 %Recovery CO_2 untuk MDEA pada suhu 303.15 - 323.15 K

T(K)	MDEA
303.15	0.38
313.15	1.15
323.15	1.92

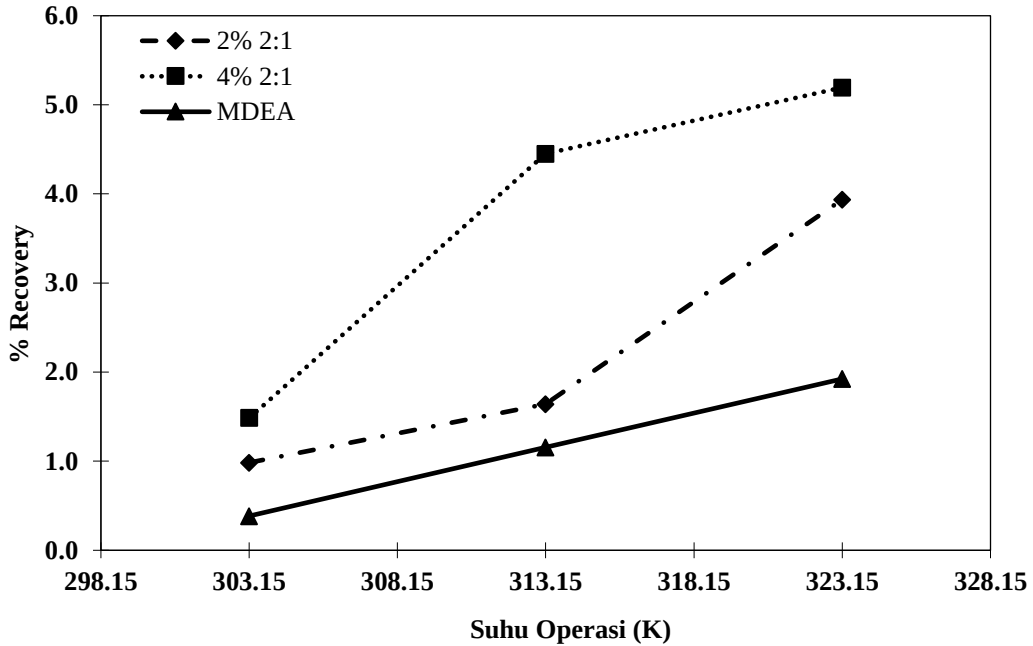
C.4 Grafik %Recovery



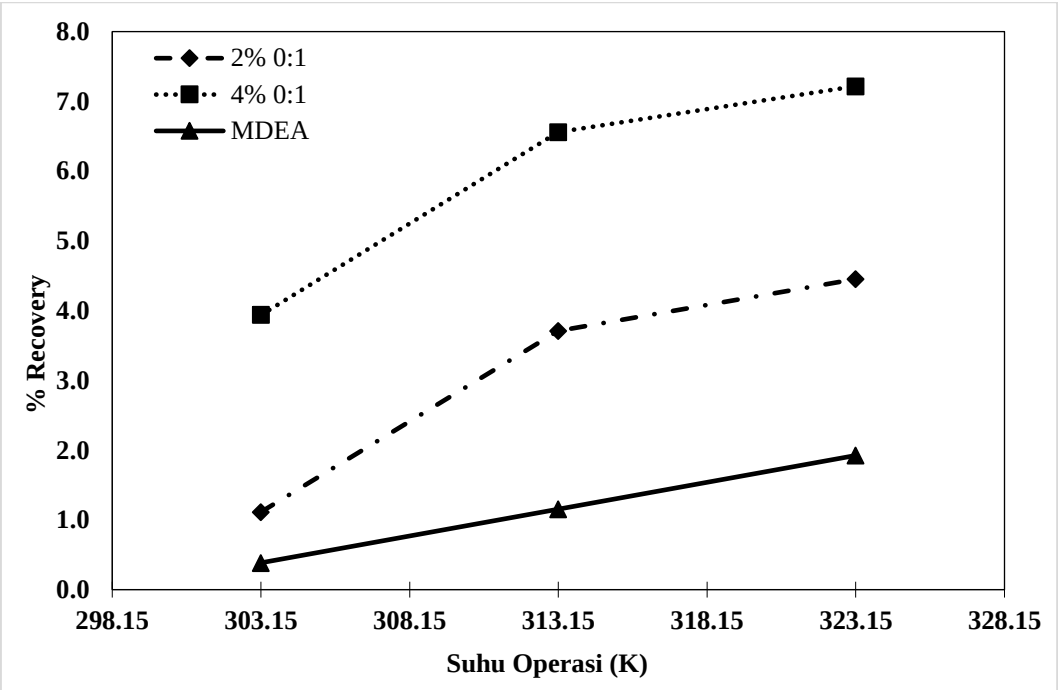
Gambar C.1 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor komposisi 1:1 pada suhu 303.15 – 323.15 K



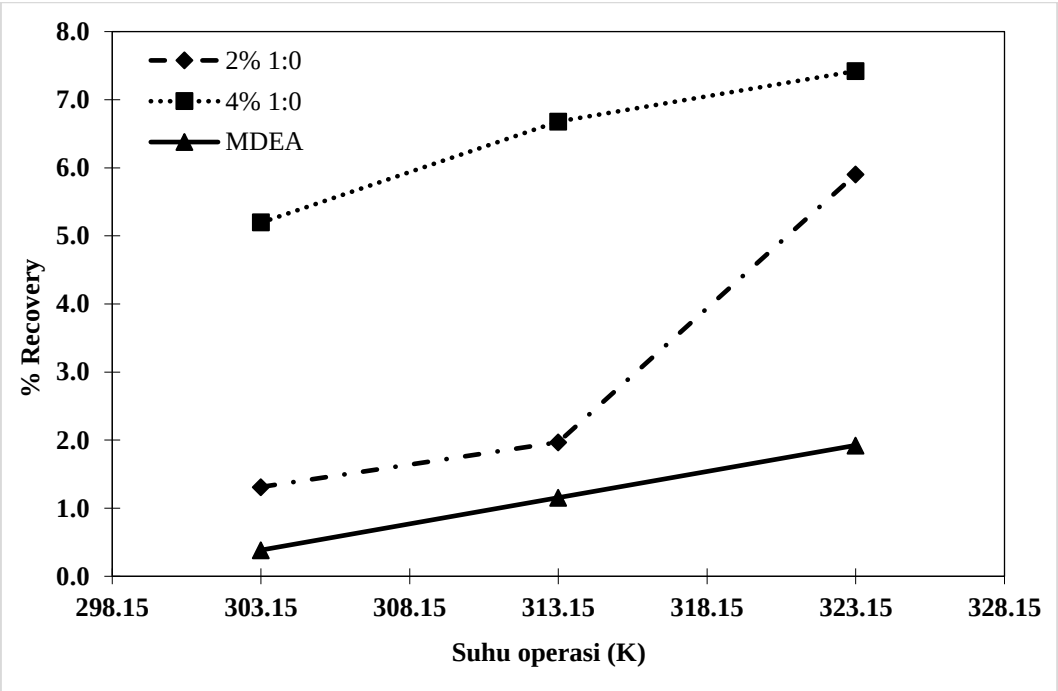
Gambar C.2 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor komposisi 1:2 pada suhu 303.15 – 323.15 K



Gambar C. 3 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor komposisi 2:1 pada suhu 303.15 – 323.15 K



Gambar C. 4 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO_2 dengan variasi % berat promotor komposisi 0:1 pada suhu 303.15 – 323.15 K



Gambar C. 5 Hubungan %Recovery dengan T(K) untuk absorpsi CO2 dengan variasi % berat promotor komposisi 1:0 pada suhu 303.15 – 323.15 K

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

RIWAYAT HIDUP PENULIS I

Gigih Hary Setiawan, lahir di Lampung Utara, 28 Januari 1996. Penulis yang sering dipanggil Gigih ini, menyelesaikan pendidikan dasarnya di SD Muhammadiyah 1 Cileungsi, dan untuk pendidikan menengahnya di SMPN 174 Jakarta dan SMAN 48 Jakarta. Kemudian penulis melanjutkan studinya di Teknik Kimia ITS. Selama menempuh kuliah, penulis aktif dalam kegiatan organisasi kemahasiswaan kampus, antara lain di Departemen Tablighul Islam KINI Teknik Kimia FTI-ITS 2015-2016 sebagai staff dan menjadi Asisten Sekretaris Umum KINI Teknik Kimia FTI-ITS 2016-2017. Pada tahun ke 3, penulis melaksanakan Kerja Praktek di PT. Badak NGL, Bontang, Kalimantan Timur. Pada akhir studi, penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa dengan tugas akhir Pra Desain Pabrik dengan judul, **"High Fructose Syrup (HFS) dari Tepung Tapioka"** dan skripsi dengan judul, **"Studi Kinetika Absorpsi CO_2 ke dalam Larutan MDEA Berpromotor *Gycine* dan *L-Glutamic Acid* Menggunakan *Wetted Wall Column*".**

Biodata Penulis I

Nama : Gigih Hary Setiawan
TTL : Lampung Utara, 28 Januari 1996
Alamat : Kota Wisata Pesona Vancouver UA 6 No. 5 Cibubur, Kabupaten Bogor, Jawa Barat
No. HP : +62 812 9318 2840
Email : gigihharysetiawan@yahoo.co.id

RIWAYAT HIDUP PENULIS II

Abdurrahman Anis Albar, lahir di Surabya, 30 Mei 1996. Penulis yang sering dipanggil Abdurrahman ini, menyelesaikan pendidikan dasarnya di SD 1 Alkhairiyah Surabaya, pendidikan menengah dan atas di SMP Alkhairiyah Surabaya dan SMAN 8 Surabaya. Kemudian penulis melanjutkan studinya di Teknik Kimia ITS. Selama menempuh kuliah, penulis aktif dalam kegiatan organisasi kemahasiswaan kampus, antara lain di Departemen Media Informasi Islam KINI Teknik Kimia FTI-ITS 2015-2016 sebagai staff dan menjadi staff ahli Media Informasi Islam KINI Teknik Kimia FTI-ITS 2016-2017. Pada tahun ke 3, penulis melaksanakan Kerja Praktek di PT. Petrokimia Gresik, Kabupaten Gresik. Pada akhir studi, penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa dengan tugas akhir Pra Desain Pabrik dengan judul, **"High Fructose Syrup (HFS) dari Tepung Tapioka"** dan skripsi dengan judul, **"Studi Kinetika Absorpsi CO_2 ke dalam Larutan MDEA Berpromotor *Gycine* dan *L-Glutamic Acid* Menggunakan *Wetted Wall Column*".**

Biodata Penulis II

Nama : Abdurrahman Anis Albar
TTL : Surabaya, 30 Mei 1996
Alamat : Jalan Petukangan gang 1 nomor 21 Surabaya
No. HP : +62 81 748 728 62
Email : Abdurrahman_albar@rocketmail.com