



SKRIPSI – TK141581

***MONOSODIUM GLUTAMATE SEBAGAI PROMOTOR
DALAM ABSORPSI CO₂ KE DALAM LARUTAN
MDEA MENGGUNAKAN PACKED COLUMN***

Oleh :

**Abdul Aziiz Nugraha
NRP. 02211440000 099**

**Ryan Adam
NRP. 02211440000 126**

**Dosen Pembimbing 1:
Dr. Yeni Rahmawati, S.T, M.T
NIP. 19761020 200501 2 001**

**Dosen Pembimbing 2:
Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc
NIP. 19510804 197412 1 001**

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



FINAL PROJECT – TK141581

**MONOSODIUM GLUTAMATE AS PROMOTOR
CARBON DIOXIDE ABSORPTION INTO MDEA
SOLUTION USING PACKED COLUMN**

Proposed by :

**Abdul Aziiz Nugraha
NRP. 02211440000 099**

**Ryan Adam
NRP. 02211440000 126**

**Dosen Pembimbing 1:
Dr. Yeni Rahmawati, S.T, M.T
NIP. 19761020 200501 2 001**

**Dosen Pembimbing 2:
Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc
NIP. 19510804 197412 1 001**

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

LEMBAR PENGESAHAN

MONOSODIUM GLUTAMATE SEBAGAI PROMOTOR DALAM ABSORPSI CO₂ KE DALAM LARUTAN MDEA MENGGUNAKAN PACKED COLUMN

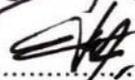
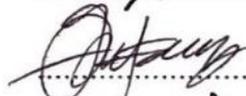
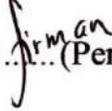
Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Departemen Teknik
Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

Abdul Aziiz Nugraha
Ryan Adam

02211440000 099
02211440000 126

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

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



**MONOSODIUM GLUTAMATE SEBAGAI
PROMOTOR DALAM ABSORPSI GAS CO₂
KE DALAM LARUTAN MDEA
MENGUNAKAN *PACKED COLUMN***

Nama : 1. Abdul Aziiz Nugraha
2. Ryan Adam
NRP : 1.0221144000099
2.0221144000126
Pembimbing : 1. Dr. Yeni Rahmawati, S.T, M.T
2. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc

ABSTRAK

Absorpsi gas CO₂ ke dalam larutan fasa cair disertai reaksi kimia banyak diaplikasikan dalam industri, salah satu aplikasinya adalah mengabsorb CO₂ dari gas sintesa untuk pembuatan amonia. Hal ini dikarenakan CO₂ dapat meracuni katalis sehingga dapat mengurangi efisiensi produksi. Untuk dapat mengabsorb CO₂ maka absorben dikontakkan dengan gas mengandung CO₂. Dalam penelitian ini, absorben yang digunakan adalah *metyldiethanol amine* (MDEA) dengan bantuan promotor *monosodium glutamate* (MSG) dengan menggunakan *packed column*. Tujuan dari penelitian ini adalah mempelajari pengaruh perubahan *flowrate* absorben terhadap CO₂ *loadings* dan efisiensi penghilangan CO₂, mempelajari pengaruh konsentrasi promotor terhadap CO₂ *loadings* dan efisiensi penghilangan CO₂. Penelitian dilaksanakan secara eksperimental menggunakan *column* dengan diameter 5,2 cm dan tinggi 190 cm yang diisi dengan *raschig ring* dengan ukuran 5 mm. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi promotor, semakin tinggi pula CO₂ *loading* dan %CO₂ *removalnya*. CO₂ *loading* tertinggi pada konsentrasi promotor 3% dengan *flowrate* 1L/menit, yaitu 0,00171 mol CO₂/mol MDEA dan %CO₂ *removalnya* tertinggi pada konsentrasi

promotor 3% dengan *flowrate* 2L/menit, yaitu 19,159%. Sementara itu, dapat dilihat bahwa semakin tinggi *flowrate*, semakin tinggi pula %CO₂ *removal*nya. Sedangkan CO₂ *loading*nya semakin menurun hal ini dikarenakan adanya *excess* MDEA. Pada *flowrate* 2 L/menit dan konsentrasi promotor 3% (0,00085 molCO₂/mol MDEA) CO₂ *loading*nya lebih rendah daripada *flowrate* 1 L/menit (0,00171 molCO₂/mol MDEA).

Kata kunci : CO₂, *Absorpsi*, *Packed Column*, MDEA, MSG

MONOSODIUM GLUTAMATE AS PROMOTOR CO₂ ABSORPTION IN MDEA SOLUTION USING PACKED COLUMN

Name : 1. Abdul Aziiz Nugraha
2. Ryan Adam
NRP : 1. 02211440000099
2. 02211440000126
Adviser : 1. Dr. Yeni Rahmawati, S.T, M.T
2. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc

ABSTRACT

The absorption of gases CO₂ into liquid phase solutions along with chemical reactions is widely applied in the industry, one application is absorbing CO₂ from synthesis gas for ammonia production. This is because CO₂ can poison the catalyst so that it can reduce production efficiency. In order to absorb CO₂ the absorbent is contacted with CO₂ containing gas. In this study, the absorbent used was metyldiethanol amine (MDEA) with the aid of a monosodium glutamate promoter (MSG) using a packed column. The purpose of this study was to study the effect of changes in absorbent flowrate on CO₂ loadings and CO₂ removal efficiency, study the effect of promoter concentration on CO₂ loadings and CO₂ removal efficiency. The experiment was carried out experimentally using a column with a diameter of 5.2 cm and a height of 190 cm filled with a raschig ring of 5 mm. The results of this study indicate that the higher the promoter concentration, the higher the CO₂ loading and % CO₂ removal. CO₂ loading is highest at 3% promoter concentration with 1 L/ min flowrate, 0.00171 mol CO₂/mol MDEA and % CO₂ removal is highest at 3% promoter concentration with 2 L/min flowrate, ie 19.159%. Meanwhile, it can be seen that the higher the flowrate, the higher the % CO₂ removal, however, the CO₂ loading is decreasing this is due to the excess MDEA. At a flowrate of 2 L/min and a concentration of 3%

promoter (0.00085 mol CO₂/mol MDEA) the CO₂ loading is lower than the 1 L/min flowrate (0.00171 mol CO₂/mol MDEA).

Keywords: *CO₂, Absorbtion , Packed Column, MDEA, MSG*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT karena dengan rahmat dan berkah-Nya kami dapat menyelesaikan Laporan Skripsi yang berjudul :

**“*MONOSODIUM GLUTAMATE* SEBAGAI PROMOTOR
DALAM ABSORPSI CO₂ KE DALAM LARUTAN MDEA
MENGUNAKAN *PACKED COLUMN*”**

Tugas Laporan 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 terimakasih kepada

1. Allah SWT karena dengan rahmat-Nya kami dapat menyelesaikan proposal skripsi ini.
2. Orangtua dan keluarga kami atas segala kasih sayang dan perhatian yang telah diberikan.
3. Bapak Juwari, S.T.,M.Eng., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Kimia FTI-ITS.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Ali Altway, MSc selaku Kepala Laboratorium Proses Perpindahan Panas dan Massa, serta selaku dosen pembimbing II yang telah banyak memberikan masukan bagi kami.
5. Ibu Dr. Yeni Rahmawati, S.T, M.T selaku dosen pembimbing I yang telah banyak memberikan masukan bagi kami.
6. Bapak dan Ibu selaku dosen pengajar serta seluruh karyawan Departemen Teknik Kimia FTI-ITS.
7. Teman-teman Laboratorium Proses Perpindahan Panas dan Massa, rekan-rekan Teknik Kimia angkatan 2014, serta semua pihak yang telah membantu secara langsung maupun tidak langsung.

Kami menyadari bahwa penyusunan Laporan Skripsi ini masih perlu penyempurnaan, oleh karena itu kami mengharap

saran dan kritik yang membangun. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua, khususnya di bidang teknik kimia dan aplikasi industri kimia. Terima kasih.

Surabaya, Juli 2018

Penyusun

DAFTAR ISI

Abstrak	i
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	ix
Daftar Tabel	x
BAB I PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Perumusan Masalah	4
I.3 Batasan Masalah	4
I.4 Tujuan Penelitian	4
I.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 Karbon Dioksida (CO ₂)	7
II.2 Teknologi Pemisahan CO ₂	10
II.3 Pemilihan Pelarut dan Promotor	13
II.4 Absorpsi Menggunakan Packed Colum.....	20
II.5 Penelitian Terdahulu	25
II.6 Studi Penelitian Sebelumnya.....	28
BAB III METODE PENELITIAN	
III.1 Deskripsi Penelitian	35
III.2 Rancangan Percobaan	35
III.3 Bahan dan Alat yang Digunakan	35
III.4 Langkah Percobaan	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
IV.1 Pengaruh Perubahan Laju Alir Absorben Terhadap CO ₂ <i>Loading dan %CO₂ Removal</i>	45
IV.2 Pengaruh Kenaikan Konsentrasi Promotor Terhadap Nilai <i>CO₂ Loading dan CO₂ Removal</i>	49
BAB V KESIMPULAN	
V.1 Kesimpulan	55
IV.2 Saran	55
DAFTAR PUSTAKA	xi

DAFTAR NOTASI	xiv
LAMPIRAN	xvii

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Konsep teori 2 film Whitman	II-6
Gambar II.2 Struktur Kimia MDEA dan <i>L-Glutamic Acid</i>	II-11
Gambar II.3 Area Kontak Fase Gas dan Liquid pada <i>Packed Column</i>	II-14
Gambar III.1 Skema Peralatan <i>Packed Column Absorber</i>	III-4
Gambar III.2 <i>Raschig Ring</i> pada <i>Packing Kolom Absorber</i> ...	III-5
Gambar III.3 Rangkaian <i>Packed Column Absorber</i> yang Digunakan	III-6
Gambar III.4 Diagram Alir Percobaan	III-8
Gambar III.5 Skema Peralatan Analisa Titrasi <i>Chittick</i>	III-9
Gambar IV.1 Grafik Hubungan CO_2 <i>Loading</i> dengan <i>Flowrate</i> Pelarut	IV-3
Gambar IV.2 Grafik Hubungan CO_2 <i>Removal</i> dengan <i>Flowrate</i> Pelarut	IV-4
Gambar IV.3 Grafik Hubungan CO_2 <i>Loading</i> dengan Konsentrasi Promotor	IV-6
Gambar IV.4 Grafik Hubungan $\% \text{CO}_2$ <i>Removal</i> dengan Konsentrasi Promotor	IV-7

DAFTAR TABEL

Tabel II.1 Karakteristik Fisik CO ₂	II-1
Tabel II.2 Spesifikasi Batas Konsentrasi Gas CO ₂ dalam Proses Industri	II-3
Tabel II.3 Sifat-sifat Fisik MEA, DEA, dan MDEA	II-9
Tabel II.4 Perbandingan MEA, DEA, dan MDEA	II-9
Tabel II.5 Perbandingan Macam-macam Garam Asam Amino Sebagai Promotor	II-10
Tabel II.6 Penelitian Terdahulu	II-17
Tabel IV.1 Analisa CO ₂ <i>Loading</i> pada Konsentrasi Promotor dan <i>Flowrate</i> Pelarut Sesuai Variabel Eksperimen	IV-2
Tabel IV.2 Nilai CO ₂ <i>Loading</i> dari Literature	IV-9

BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, proses pemisahan CO₂, bukan sebagai limbah tetapi sebagai bahan baku yang berharga, dan konversinya menjadi produk yang memiliki nilai ekonomis, sangatlah menarik perhatian dunia industri. Karbondioksida digunakan sebagai bahan mentah untuk produksi dalam industri petrokimia khususnya urea dan metanol. Untuk menggunakan CO₂ di setiap industri petrokimia, diperlukan penilaian lengkap mengenai permintaan pasar, cara-cara yang digunakan untuk pengadaan CO₂ dan bahan baku lain (Koohestanian, 2017)

Gas CO₂ dapat dikonversi menjadi metana dan metanol melalui reaksi Sabatier (Irazoqui, 1993). Produk lain yang didapatkan dengan bahan baku CO₂ adalah urea. Urea digunakan secara luas dalam industri pupuk sebagai bahan yang kaya akan sumber nitrogen. Urea tidak beracun dan memiliki biaya transportasi terendah per unit nutrisi nitrogen. Selain itu, urea dapat digunakan sebagai bahan baku dalam produksi berbagai macam bahan kimia penting seperti plastik, resin, dan *adhesive*. Beberapa turunannya antara lain, *urea-formaldehyde*, *urea-melamine-formaldehyde*, dan bahan peledak *ureanitrate* (Maxwell, 2009). Dari data ulasan Aresta (2013) mengenai perubahan paradigma utilisasi CO₂ dapat diindikasikan bahwa, saat ini, sekitar 180 Mt/tahun urea sedang diproduksi di seluruh dunia. Sedangkan untuk memproduksi urea sebanyak itu, diperlukan gas CO₂ sebanyak 132 Mt/tahun.

Umumnya, terdapat tiga metode yang digunakan untuk proses produksi urea dengan bahan baku gas alam. Pada salah satu metode tersebut, setelah proses purifikasi dan desulfurisasi, gas alam diubah menjadi *syngas* pada unit *reforming*. Dikarenakan sifat alami molekul CO₂ yang beracun terhadap katalis pembentukan ammonia, komponen ini harus dihilangkan dan dikurangi hingga <1% pada unit lain seperti CO₂ *separator*, unit

metanasi, dan/atau unit *cryogenic*. Selain itu, proses *CO₂ removal* ini dapat mengurangi ukuran peralatan, *operation* dan *total cost*, dan meningkatkan laju konversi pada unit ammonia. Terakhir, *CO₂* dan *NH₃* akan dikonversi menjadi urea dan air pada unit urea.

Melihat besarnya kerugian yang ditimbulkan oleh gas *CO₂*, maka penting dilakukan proses pemisahan *CO₂* dari aliran umpan gas alam. Lengkapnya, Rao dan Rubin (2002) mengemukakan ada beberapa teknologi untuk memisahkan dan menangkap karbondioksida seperti: proses absorpsi secara fisik dan kimia, proses adsorpsi, proses *cryogenic* (pendinginan), teknologi membran dan menggunakan sistem alga atau mikroba. Salah satu metode pemisahan *CO₂* yang umum digunakan, yaitu absorpsi secara kimiawi, merupakan metode yang diharapkan bisa mengurangi kadar *CO₂* hingga level ppm dan tidak sensitif terhadap *partial pressure* *CO₂*. Selain itu teknologi ini dipilih juga karena lebih ekonomis dan telah dikembangkan dengan baik serta telah diaplikasikan pada berbagai proses komersial.

Proses absorpsi kimiawi merupakan proses pemisahan gas menggunakan pelarut dengan reaktan yang dapat bereaksi dengan komponen gas yang terlarut pada suatu kolom *absorber*. Penggunaan pelarut kimia dimaksudkan untuk meningkatkan pelarut dalam menyerap gas *CO₂*. Beberapa jenis pelarut yang sering digunakan adalah pelarut organik seperti sulfinol; kalium karbonat (*K₂CO₃*); dan senyawa *alkanolamine* seperti *Monoethanolamine* (MEA), *Diethanolamine* (DEA), *Diisopropanolamine* (DIPA), *Diglycolamine* (DGA), *Triethanolamine* (TEA), *Methyldiethanolamine* (MDEA), 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) dan 2-piperidineetanol (2-PE).

Absorpsi *CO₂* menggunakan pelarut kimia seperti larutan *alkanolamine* merupakan salah satu metode yang paling efektif, karena memiliki keuntungan yaitu secara struktural, senyawa ini mengandung sedikitnya satu gugus hidroksil yang membantu mengurangi tekanan uap dan meningkatkan kelarutannya dalam air. Gugus amino menyediakan cukup alkalinitas untuk menyerap *CO₂* (Rinprasertmeechai, 2012). Huttenhuis (2007) mempelajari

kelarutan gas CO₂ dalam pelarut n-MDEA (*Methyldiethanolamine*), dimana MDEA dipilih sebagai absorben karena mempunyai beberapa kelebihan yaitu tekanan uapnya rendah, tidak mudah mengalami degradasi, lebih tidak korosif dibandingkan pelarut alkanolamine jenis lain, panas reaksi rendah, selektivitas tinggi terhadap CO₂, serta lebih atraktif dan stabil. Adapun kekurangannya adalah kecepatan reaksi dengan CO₂ lambat, cenderung membentuk foam pada konsentrasi tinggi dan harganya mahal (Polasek dan Bullin, 2006). Untuk mengatasi kekurangan tersebut dapat ditambahkan promotor yang memiliki kecepatan reaksi lebih tinggi dengan CO₂. Promotor yang biasa digunakan adalah garam-asam amino seperti *sarcosine*, *proline*, *arginine* atau *glycine*.

Pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Shufeng Shen (2013) yaitu mengenai absorpsi gas CO₂ dalam larutan K₂CO₃ dengan menambahkan promotor *Arginine*, menunjukkan *activation effect* dari *Arginine* dengan variasi konsentrasi dan suhu mampu meningkatkan kecepatan absorpsi. Kemudian, pada jurnal J. Van Holst et al (2009) menunjukkan berbagai data kinetika asam amino sebagai promotor, dimana *Arginine* memiliki kinetika paling baik dari asam amino lainnya. Namun *Arginine* dianggap kurang ekonomis karena membutuhkan biaya yang mahal dibandingkan promotor lainnya. Salah satu asam amino yang ekonomis yaitu *L-Glutamic Acid*, yang banyak ditemukan dalam *Monosodium Glutamate*, dimana kereaktifannya akan diuji dalam penelitian ini. Dengan mempertimbangkan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan, diharapkan penelitian absorpsi CO₂ menggunakan pelarut MDEA dengan promotor garam *Monosodium Glutamate* (MSG) mampu menjadi alternatif promotor campuran yang lebih ekonomis dengan harga kinetika yang diharapkan serta memiliki performa dalam penyerapan gas CO₂ yang lebih baik.

I.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, dapat dirumuskan suatu masalah yaitu perlunya penambahan promotor pada absorbent MDEA untuk dapat meningkatkan kecepatan reaksinya terhadap CO₂. Sehingga perlu dipelajari efek penambahan campuran promotor terhadap kecepatan reaksi absorpsi CO₂ oleh MDEA. Promotor yang akan digunakan pada percobaan ini adalah *Monosodium glutamate* dengan komposisi dan kondisi operasi tertentu.

I.3 Batasan Masalah

Untuk membatasi masalah yang akan dibahas maka digunakan batasan sebagai berikut:

1. Absorpsi CO₂ dilakukan pada kolom absorber dengan *packed column* untuk mendapatkan data CO₂ loading dari proses absorpsi.
2. Kondisi operasi yang digunakan pada temperatur 30 °C (303.15 K) dan tekanan atmosferik (1 atm).
3. Absorpsi CO₂ menggunakan *Methyldiethanolamine* (MDEA) sebagai *solvent* serta *Monosodium Glutamate* (MSG) sebagai promotor.
4. Proses pemisahan CO₂ dilakukan dengan menggunakan umpan campuran gas CO₂ 20% dan N₂ 80%.

I.4 Tujuan Penelitian

1. Mempelajari pengaruh perubahan *flowrate* absorbent terhadap CO₂ loading dan efisiensi penghilangan CO₂.
2. Mempelajari pengaruh konsentrasi promotor terhadap CO₂ loading dan efisiensi penghilangan CO₂.

I.5 Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini didapatkan data mengenai performa *packed column* yang digunakan dalam penelitian pada beberapa kondisi operasi proses absorpsi gas CO₂ ke dalam larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) berpromotor *Monosodium*

Glutamate (MSG) yang berupa CO₂ loading dan %CO₂ removal dari percobaan yang dilakukan.

(HALAMAN SENGAJA DIKOSONGKAN)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Karbon Dioksida (CO₂)

Karbon dioksida (CO₂) 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 CO₂ terdapat di atmosfer dalam jumlah kecil yaitu sekitar 370 ppmv. Dalam jumlah yang tidak besar in, gas CO₂ memainkan peran yang sangat penting dalam kehidupan di bumi. Gas CO₂ merupakan gas yang tidak berbau dan berwarna. Gas CO₂ termasuk oksida asam dan tidak berbentuk cair pada tekanan dibawah 5.1 atm tetapi berbentuk padat pada temperatur di bawah -78⁰C. Dalam bentuk padat, CO₂ disebut *dry ice*. Pada temperatur diatas 31,1⁰C (pada kondisi diatas 73,9 bar yang merupakan tekanan pada titik kritis), CO₂ dikatakan berada pada kondisi superkritis dimana CO₂ 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 CO₂

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
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	1562	kg/m ³

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

Gas CO₂ dalam udara murni berjumlah 0,03%, bila melebihi toleransi dapat mengganggu pernapasan. Selain itu, gas CO₂ yang terlalu berlebihan di bumi dapat mengikat panas matahari sehingga suhu bumi panas. Pemanasan global di bumi akibat CO₂ disebut juga sebagai efek rumah kaca. Pemanasan global sudah lama menjadi perbincangan, namun belum juga ada cara yang efektif untuk menghilangkannya atau setidaknya untuk mengurangnya.

Gas CO₂ di produksi hampir 97% dari hasil pembakaran bahan bakar fosil, seperti dari sumber batu bara, minyak, gas alam, dan biomassa. Keberadaan CO₂ pada industri gas alam dapat menurunkan nilai *heating value* pada gas dan komponen asam dapat menyebabkan korosi pada peralatan. Di dalam industri pengolahan gas alam kandungan gas CO₂ yang berlebihan

berbahaya bagi unit operasi, dikarenakan gas CO₂ dapat membentuk asam karbonat dengan air, sehingga kandungan gas CO₂ harus dihilangkan secara keseluruhan atau sebagian sebagai langkah pencegahan serta untuk syarat spesifikasi produk dengan pembeli produk gas alam (Arnold dan Stewart, 1999). Pada pipa gas alam, kandungan CO₂ yang diizinkan sekitar 1-2% mol (Buckingham, 1964; Ma'mun, 2005).

Adanya CO₂ 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 CO₂. Gas CO₂ yang keluar meninggalkan kolom harus memenuhi spesifikasi batas gas CO₂ (**Tabel II.2**).

Tabel II. 2 Spesifikasi batas konsentrasi gas CO₂ 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 CO₂ yakni, melakukan konservasi dan

efisien pada semua unit pabrik, Memanfaatkan gas CO₂ yang tersisa misalnya untuk refrigerasi, *dry ice*, dan mereduksi gas CO₂ menjadi produk yang lebih bermanfaat, contohnya methanol.

II.2 Teknologi Pemisahan CO₂

Selain hidrokarbon berat dan uap air, gas alam juga sering mengandung kontaminan lain yang mungkin harus dibuang. Karbon dioksida (CO₂), hidrogen sulfida (H₂S), dan senyawa sulfur lainnya seperti *mercaptans* adalah senyawa yang mungkin perlu dihilangkan secara keseluruhan atau parsial. Komponen-komponen ini biasanya disebut sebagai “*acid gas*” (gas asam).

Pemisahan CO₂ dengan adsorpsi menggunakan prinsip penyerapan CO₂ pada permukaan adsorben melibatkan reaksi kimia. Proses yang sering digunakan seperti yang telah disebutkan sebelumnya yakni, *Iron Sponge*, *Zinc Oxide*, dan *Molecular Sieve*. Adsorben solid, seperti zeolit dan *activated carbon*, bisa digunakan untuk memisahkan CO₂ dari campuran gas. PSA (*Pressure Swing Adsorption*) dan TSA (*Temperature Swing Adsorption*) adalah metode komersial yang digunakan dalam proses pemisahan gas dan digunakan sampai batas tertentu dalam produksi hidrogen dan penghilangan CO₂ dari gas alam. Di dalam *Pressure Swing Adsorption*, campuran gas dialirkan melalui sebuah *packed bed* yang berisi adsorben pada tekanan tinggi hingga konsentrasi gas yang diinginkan mendekati equilibrium. *Bed* diregenerasi dengan cara menurunkan tekanannya. Sedangkan dalam *Temperature Swing Adsorption*, adsorben diregenerasi dengan cara menaikkan suhunya. Kelebihan dari metode ini ialah cukup baik untuk menangkap H₂S tetapi kurang baik untuk adsorpsi CO₂, karena kapasitas dan selektivitas CO₂ dari adsorben yang ada rendah.

Distilasi kriogenik ialah distilasi pada suhu yang sangat rendah, mencapai -180°C. Distilasi kriogenik ini digunakan secara luas dan komersial untuk aliran yang memiliki konsentrasi CO₂ yang sangat tinggi (biasanya >90%) tapi tidak digunakan untuk aliran CO₂ yang lebih encer. Kelebihan dari metode ini adalah cairan CO₂ dapat diproduksi langsung, yang dibutuhkan untuk opsi transportasi tertentu, seperti transportasi dengan kapal. Kerugian

utama dari metode ini yakni, metode ini membutuhkan persiapan awal *feed* yang rumit, instalasi unit ini sangat mahal, dan kebutuhan energi yang sangat tinggi. Pemisahan CO₂ dengan absorpsi ialah metode yang paling sering dijumpai. Absorpsi lebih disukai dalam industri pengolahan gas dibanding teknologi lain karena memiliki efektivitas tinggi, kualitas produk yang baik, dan relative mudah serta murah jika melihat efektivitasnya. (CO₂ Capture Project, 2008)

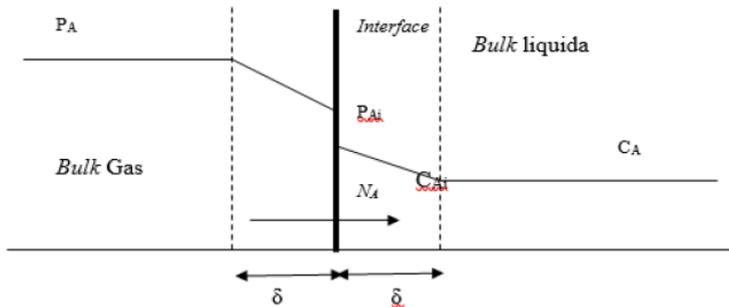
Teknologi absorpsi prinsipnya adalah melarutkan CO₂ dalam pelarut yang sesuai. Perbedaan kelarutan antara gas lain dan CO₂ dalam absorben menyebabkan produk keluaran akan bersih dari CO₂. Untuk dapat mengabsorb CO₂ maka absorben dikontakkan dengan gas mengandung CO₂. Ada beberapa pengontakkan CO₂ dengan 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 CO₂ akan masuk dari bagian bawah kolom absorber dan solven dimasukkan dari atas, sehingga terjadi kontak secara *countercurrent* dan CO₂ 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. Material yang diserap akan larut secara fisik dalam cairan. Salah satu teori yang dapat menggambarkan fenomena perpindahan massa yang terjadi pada absorpsi fisik yaitu dengan teori lapisan film. Pada teori ini dianggap ada suatu lapisan stagnan dalam kedua fase sepanjang *interface*. Di dalam fase gas perpindahan massa komponen A kedalam *interface* mengalami tahanan dalam film gas dan tahanan perpindahan massa komponen A dari *interface* ke badan cairan

film cair. Teori dua film merupakan teori untuk keadaan *steady state*. Diasumsikan bahwa gas dan cairan berada pada kesetimbangan pada *interface* dan bahwa film-film tipis memisahkan *interface* dari bagian kedua fase. (Treybal, 1980). Secara skematis model film Whitman diberikan pada **Gambar 2.1**. Gradien konsentrasi A antara $x = 0$ sampai $x = \delta$ adalah konstan dalam film stagnan bila tidak terjadi generasi atau reaksi kimia.



Gambar II.1 Konsep teori 2 film Whitman untuk perpindahan massa fase gas-cair

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. Proses absorpsi kimia memiliki beberapa keuntungan yaitu dapat meningkatkan *yield* reaksi dan *selectivity*, serta mengatasi hambatan termodinamika seperti reduksi dalam konsumsi energi. Oleh karena adanya interaksi antara reaksi kimia dan perpindahan massa dan panas yang cukup kompleks (Gorak & Kenig, 2005).

Dalam absorpsi yang disertai dengan reaksi kimia, suatu molekul A (solute), akan diserap ke dalam suatu cairan B (absorben), dimana komponen A bereaksi dengan komponen B. Reaksi tersebut bisa berlangsung dalam regim cepat, lambat,

reversible, *irreversible*, dan sembarang orde reaksi. Proses keseluruhan dapat diperkirakan menjadi 4 tahapan, yaitu:

1. Difusi A ke fase gas menuju interface gas-cair
2. Difusi A dari *interface* ke dalam cairan, dan difusi B dari cairan menuju interface serta terjadi reaksi antara A dan B
3. Difusi produk dari reaksi dalam fase cair, produk volatil akan mendifusi ke *interface*
4. Difusi produk gas menuju fase gas

(Astarita, 1967)

Adanya reaksi kimia dapat mengubah profil konsentrasi A, gradien konsentrasinya akan naik sehingga mempercepat laju absorpsinya dibandingkan dengan absorpsi fisik. Pada kasus absorpsi gas A kedalam liquida, ada kemungkinan gas terlarut A bereaksi dengan pelarut/reaktan lain dalam liquida dengan laju reaksi r_A .

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

II.3.2 Pemilihan Pelarut

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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ adalah air dan NaOH. Namun, senyawa tersebut tidak se-efektif senyawa amina dalam menyerap CO₂. Pelarut kimia yang lainnya adalah K₂CO₃ yang digunakan untuk menghilangkan H₂S dan CO₂ 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 ⁰ C)	25	0,01	1
Massa Jenis (kg/m ³)	1012	1090	1043
Normal Boiling Point (°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 *Monosodium Glutamate* (MSG). Larutan MDEA digunakan karena memiliki beberapa keuntungan yaitu energi yang dibutuhkan kecil, kapasitas penyerapan dan stabilitas yang tinggi. Namun larutan MDEA ini memiliki kekurangan yaitu kecepatan reaksi yang rendah. Maka dari itu digunakan *Monosodium Glutamate* (MSG) sebagai promotor.

II.3.2 Pemilihan Promotor

Kombinasi beberapa pelarut dapat dilakukan dengan tujuan untuk mencampurkan antar pelarut dengan laju penyerapan rendah dengan pelarut lain yang memiliki laju reaksi penyerapan

MDEA	$2.07 \times 10^9 \exp\left(\frac{-5912.7}{T}\right)$	Pawlak, dkk., 2011
Arginine	$2.58 \times 10^{16} \exp\left(\frac{-8645}{T}\right)$	Shen, dkk., 2013
Glycine	$5.3409 \times 10^{13} \exp\left(\frac{-3251.9}{T}\right)$	Elhosane, dkk., 2016
Arginine	$1.91 \times 10^{25} \exp\left(\frac{-12296}{T}\right)$	Sitorus, dkk., 2016

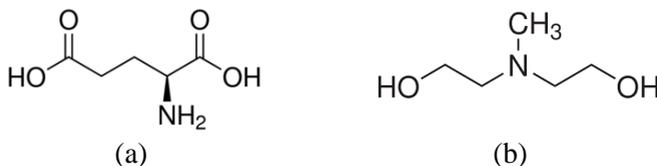
(Sitorus, dkk., 2016)

Dari beberapa penelitian mengenai absorpsi *acid gas* menggunakan pelarut yang teraktivasi dapat dilihat bahwa sifat alamiah garam asam amino yang mampu meningkatkan performa absorpsi berpotensi untuk meneliti lebih lanjut kinetika dan kereaktifannya. Namun, ada beberapa kelemahan dari asam amino yang lain yang harus diperhatikan, contoh: *arginine* dan *piperazine* dianggap kurang ekonomis karena membutuhkan biaya yang mahal dibandingkan promotor lainnya. Maka dari itu dilakukanlah penelitian yang serupa menggunakan garam asam amino lain yang diharapkan mampu memiliki kualitas yang serupa dan mampu mengabaikan kekurangan-kekurangan dari garam asam amino yang lain, seperti garam asam amino *L-glutamic acid*, yang banyak terkandung di dalam *Monosodium Glutamate* (MSG).

Tabel II. 6 Perbandingan Macam-macam Garam Asam Amino Sebagai Promotor

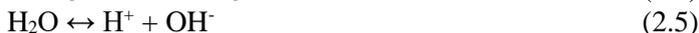
Asam Amino	Rumus Kimia	Berat Molekul	pK _b	Harga
<i>Piperazine</i>	C ₄ H ₁₀ N ₂	86,136 g/mol	4,19	Rp450.000,00/kg (bukalapak)
<i>Monosodium m Glutamate</i>	C ₅ H ₈ NO ₄ Na	169,111 g/mol	9,54	Rp26.000,00/kg (tokopedia)
<i>Arginine</i>	C ₆ H ₁₄ N ₄ O ₂	174,2 g/mol	11,509	Rp20.150.000,00/kg (maersk)
<i>Glycine</i>	C ₂ H ₅ NO ₂	75,07 g/mol	9,6	Rp289.600,00 (Chembase)

L-Glutamic Acid adalah asam α -amino dengan rantai samping karboksilat. *L-Glutamic Acid* adalah asam amino *non-essential* yang sangat dibutuhkan oleh tubuh. Amina tersier (MDEA) diprediksi dapat bereaksi dengan CO_2 meskipun reaksi yang terjadi relatif lambat. Berikut adalah struktur kimia dari MDEA ($\text{CH}_3\text{N}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_2$) dan *L-Glutamic Acid* ($\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}_4$).



Gambar II. 2 Struktur kimia (a) MDEA dan (b) *L-Glutamic Acid*

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

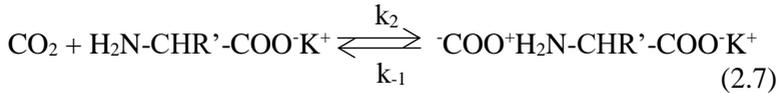


Asam amino terbagi menjadi tiga keadaan fisik yakni asam, *zwitterionic* dan basis atau deprotonasi. Untuk keadaan asam dan *zwitterionic* asam amino kurang reaktif terhadap CO_2 dari pada keadaan deprotonasi. Asam amino yang terlarut dalam air berada dalam keadaan *zwitterionic* dengan amino yang terprotonasi. 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):

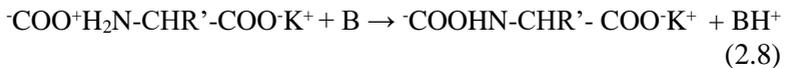


Beberapa peneliti (Holst dkk, 2009; Vaidya dkk, 2010; Kim dkk, 2012; Paul dan Thomsen, 2012; Kumar dkk, 2003; Jing

dkk, 2012) menunjukkan reaksi antara CO₂ dan asam amino yang telah diprotonasi.



Reaksi ini diikuti dengan penghilangan proton oleh suatu basa, B. Pada system ini seperti KR'⁺NH₂, OH⁻, H₂O, dan asam amino yang telah diprotonasi.



II.4 Absorpsi Menggunakan *Packed Column*

Packed column (tower) merupakan *scrubber* yang paling umum digunakan untuk absorpsi gas. *Packed column* mendispersi *scrubbing liquid* di atas packing material yang memberikan *surface area* yang luas tempat terjadinya kontak antara gas dan liquid. *Packed tower* diklasifikasikan berdasarkan arah relatif dari aliran gas menjadi liquid. Dimana *packed tower* yang paling sering dipergunakan adalah aliran *countercurrent (gas to liquid) flow tower*. Aliran gas memasuki dasar tower dan mengalir ke atas melewati *packing material*. Liquid disemprotkan di bagian atas *sprayer* atau *weir* dan mengalir ke bawah sepanjang packing material.

Prinsip kerja *packed column* zat yg berbeda fase mengalir berlawanan arah yg dpt menyebabkan komponen kimia ditransfer dari satu fase ke fase lain. Zat berfase cair mengalir dari atas dan gas dari bawah sehingga terjadi kontak antara keduanya.

Pemilihan *packed tower* yang digunakan banyak alasannya bisa karena untuk liquid korosif, dikarenakan alat lebih murah sehingga terjadi suatu korosif tidak merugikan terlalu banyak. Bisa juga karena membutuhkan tahanan liquid yang rendah karena densitasnya yang besar. Ataupun memberikan *pressure drop* pertahap kesetimbangan yang rendah dan untuk diameter kolom yang kecil.

Packed tower dapat digunakan sebagai kolom fraksinasi untuk distilasi kontinu atau batch. Ukuran packing 3/2 atau 2 inchi umumnya memberikan kapasitas yang sama dengan *sieve tray*. *Packed* umumnya berkisar 1 sampai 2 *feet*. Packing yang lebih kecil mempunyai kapasitas lebih rendah dan hal ini tidak mungkin digunakan dalam kolom yang besar. Umumnya *pressure drop per equivalent theoretical plate* lebih kecil dari pada *sieve tray* atau *bubble cap tray*, hal ini menguntungkan untuk operasi pada keadaan vakum.

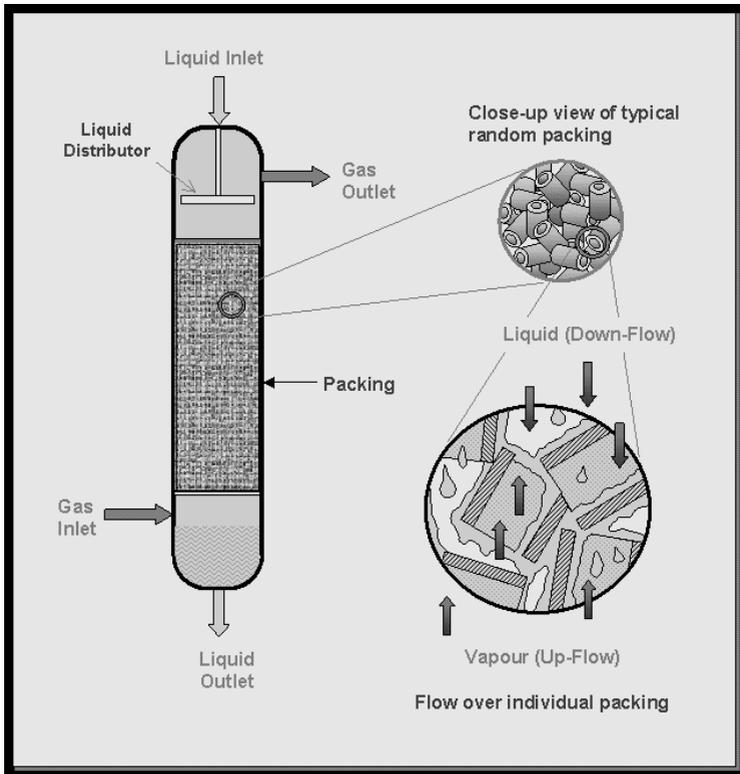
Untuk *packed tower*, dikenal suatu istilah HETP, yaitu tinggi *packed tower* yang menghasilkan perubahan komposisi yang sama dengan perubahan komposisi yang dihasilkan oleh dua plate yang berurutan (jarak antar plate yang sama). Pemilihan bahan *packing* antara keramik yang digunakan untuk liquid yang bersifat korosif ada juga Plastik yang cocok untuk temperatur sedang dan tidak cocok untuk pelarut organik dan juga logam yang berlaku untuk kondisi operasi yang tidak stabil.

Syarat packing yang bagus adalah :

- 1) Densitas *bulk* kecil (tdk terlalu membebani kolom)
- 2) Luas yang terbasahi besar
- 3) Volume rongga besar (mengurangi pressure drop)
- 4) Sifat pembasahan baik
- 5) Tahan korosi
- 6) Memiliki struktur yang kuat utk menahan beban tumpukan
- 7) Murah

Macam - macam bentuk packing :

- 1) Sederhana : *raschig ring*, harga lebih murah tapi efisiensi lebih rendah, sering *chanelling*
- 2) Sedang : *pall ring*, batas flooding tinggi dan distribusi liquid baik.
- 3) Tinggi : *berl saddle*, mahal, *bed* seragam, batas *flooding* tinggi dan *pressure drop* rendah.



Gambar II. 3 Area Kontak Fase Gas dan Liquid pada *Packed Column*

Contoh penggunaan *packing* kolom di pabrik biasanya oleh PT. PERTAMINA EP *Field* Subang Region Jawa. Di pabrik tersebut merupakan salah satu industri yang menggunakan sistem kendali otomatis dalam proses produk minyak. Sistem kendali otomatis sangat diperlukan dalam operasi-operasi industri misalnya untuk pengontrolan tekanan, temperature, *level*, kelembaban, viskositas dan *flowrate* dalam proses produksi. Otomatisasi saat ini tidak hanya diperlukan sebagai pendukung keamanan operasi, faktor ekonomi maupun mutu produksi, namun telah menjadi suatu kebutuhan pokok bagi proses industri.

Absorber Column sebagai ruang dimana untuk melakukan penyerapan CO₂ dengan cara mengalirkan gas dari bagian bawah dan MDEA dari atas (*countercurrent*). Pertukaran massa dan energi terjadi pada bagian packing absorber yang berfungsi memperluas kontak MDEA dengan gas.

Absorber Column diharuskan mempunyai fungsi kontrol yang handal agar terjadi penyerapan CO₂ secara sempurna sehingga menghasilkan gas dengan konsentrasi CO₂ yang diinginkan. Di dalam absorber terjadi proses kontrol yang mengatur level liquid MDEA. Kontrol level pada Absorber ini dilakukan dengan menggunakan *control valve* yang di letakkan pada *outlet absorber*.

Proses kontrol ini bertujuan untuk memastikan bahwa tidak ada gas yang ikut terbawa keluar dari *bottom absorber*, hal ini karena jika ada gas yang sampai ikut terbawa akan mengakibatkan terjadinya aliran gas bertekanan tinggi pada pipa sebesar 35,86 kg/cm² (tekanan dari absorber) yang akan menghantam semua instrument yang dilewati oleh aliran gas ini.

Absorber berfungsi sebagai tempat untuk melakukan penyerapan CO₂ dengan cara mengalirkan gas dari bagian bawah dan MDEA dari atas (*countercurrent*). Pertukaran massa dan energi terjadi pada bagian packing absorber yang berfungsi memperluas kontak MDEA dengan gas. Gas keluaran absorber (*treated gas*) meninggalkan absorber dengan konsentrasi CO₂ yang diinginkan. Penyerapan akan optimal jika tekanan setinggi-tingginya (+36 kg/cm²) dan suhu serendah-rendahnya (+60°C) karena pada kondisi ini kelarutan karbondioksida cukup tinggi. Pada saat penyerapan CO₂ terjadi proses *exothermis* yaitu proses mengeluarkan energi/panas yang mengakibatkan temperatur pada absorber akan naik. Parameter absorpsi dalam proses CO₂ Removal adalah :

- 1) Strength amine 50% -55%
- 2) Pressure setinggi mungkin (sesuai design) dan kondisi operasi
- 3) Temperatur inlet amine sesuai dengan design dari produk amine sendiri

4) *Rate sirkulasi amine solution.*

Rich solution (larutan MDEA yang banyak mengandung CO₂) keluar absorber dari bagian bawah absorber menuju *heat exchanger*. Di dalam absorber terjadi proses kontrol yang mengatur level cairan MDEA. Proses kontrol ini bertujuan untuk memastikan bahwa tidak ada gas yang ikut terbawa keluar dari *bottom absorber*, hal ini dikarena jika adanya gas yang sampai ikut terbawa akan mengakibatkan terjadinya aliran gas bertekanan tinggi pada pipa sebesar 35,86 kg/cm² (tekanan dari absorber) yang akan menghantam semua instrument yang dilewati oleh aliran gas ini, sehingga hal ini akan mengakibatkan kerusakan yang fatal pada instrument-instrument tersebut, terutama pada LP *Flash Column* yang pada spesifikasinya hanya mampu menerima tekanan maksimum sebesar 1,75 kg/cm².

Level MDEA di dalam absorber di atur pada kisaran 70% dengan menggunakan control valve yang diletakkan sebelum LP *Flash Column*. Pada absorber juga terpasang level switch LS1103/1203. Pemasangan ini bertujuan jika terjadi keadaan dimana level MDEA turun dalam kisaran 10%, maka level *switch* akan memberikan sinyal inputan pada sistemnya ESD (*emergency shut down*) yang akan otomatis menghentikan proses di dalam absorber atau menghentikan proses CO₂ *removal*.

Absorber Column sebagai CO₂ *Removal* yang di dalamnya terjadi proses Absorbsi, berfungsi memisahkan gas bumi (CH₄-C₂H₆) dengan CO₂ atau tepatnya mengurangi persentasi kadar CO₂ pada gas bumi dari kadar 23% menjadi 5% dengan membuat ruang kontak antara gas dengan solvent (MDEA) di dalam Absorber, yang kemudian gas dengan kadar CO₂ sebesar 5% dialirkan ke konsumen.

Dari reaksi Absorbsi yang terjadi dalam Absorber, selain dihasilkan gas juga di hasilkan cairan MDEA yang banyak mengandung CO₂, yang disebut *rich amine*. Di dalam *absorber*, gas di alirkan melalui atas *absorber*, sedangkan *rich amine* melalui bottom absorber. Agar gas tidak ikut mengalir melalui bottom absorber, maka level *rich amine/rich* MDEA di dalam *absorber*

harus dijaga pada kisaran optimum sebesar 70%, agar tidak terlalu rendah dan tidak terlalu tinggi. Maka perlu pengaplikasian sistem kontrol level pada *absorber*.

Level dari *rich* MDEA perlu dikontrol karena bila level terlalu rendah maka dapat merusak instrument-instrument yang tidak kuat menahan gas bertekanan tinggi dan bila level terlalu tinggi, maka cairan akan menutupi jalan pipa gas masuk ke *absorber* dan mengganggu proses.

II.5 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk referensi, seperti yang telah tercantum dalam **Tabel II.7** berikut :

Tabel II. 7 Penelitian Terdahulu

No	Tahun	Nama Peneliti	Uraian
1	1970	Jose C. Merchuk, Kazuhiro Nakanishi, dan Fumitake Yoshida	Mempelajari absorpsi gas dengan reaksi kimia orde dua dalam sebuah <i>packed column</i>
	2002	Kaei I. Keskinen, Anu Kinnunen, Lars Nystrom, Juhani Aittamaa	Mempelajari metode pendekatan efisien untuk simulasi performa pemisahan dengan <i>packed column</i>

	2009	Amin Saadat, Amir Rahimi, Tauraj Tavakoli	Mempelajari studi model secara eksperimen dan matematika dari absorpsi reaktif dari karbondioksida dengan <i>alkanolamines</i> dalam sebuah <i>packed bed</i>
	2011	Ali Zakeri, Aslak Einbu, dan Hallvard F. Sveden	Mempelajari karakteristik dari material <i>packing</i> untuk absorpsi CO ₂
	2014	Amir Rahimi, Touraj Tavakoli, Amin Saadat dan Arezou Niksjar	Mempelajari <i>modeling</i> dan studi eksperimental dari CO ₂ <i>removal</i> oleh alkanolamine dalam sebuah <i>packed bed</i>
	2014	Mallikarjuna Kalika	Mempelajari absorpsi CO ₂ dalam sebuah <i>packed bed tower</i> dengan menggunakan pelarut NaOH dan menghasilkan HTU, NTU serta overall mass transfer coefficients
	2014	Praveen. S. Nair, P.P. Selvi	Mempelajari absorpsi CO ₂ dalam <i>packed column</i> serta mengevaluasi volumetric overall

			mass transfer coefficient dari absorpsi CO ₂ ke dalam larutan ammonia.
	2015	Elizabetta Brunazzi	Mempelajari studi transfer massa pada <i>catalytic structured packings</i> untuk pemisahan reaktif
	2016	Hamadi Cherif, Christophe Coquelet dkk	Mempelajari hasil eksperimental dan simulasi untuk penghilangan H ₂ S dari biogas dengan melalui <i>sodium hydroxide</i> dalam <i>structured packed columns</i>
	2016	Hassan Pashaei, Ahad Ghaemi dan Masoud Nasiri	Mempelajari studi secara eksperimen dan model pada kelarutan dan transfer massa CO ₂ ke dalam larutan DEA encer menggunakan sebuah <i>stirrer bubble column</i>
	2017	Morteza Afkhamipour dan Masoud Mofarahi	Mempelajari dan me-review pada performa transfer massa dari absorbs CO ₂ oleh larutan <i>amine</i> dalam <i>packed column</i> bertekanan rendah dan tinggi

II.6. Studi Penelitian Sebelumnya

II.6.1 Morteza Afkhamipour dan Masoud Mofarahi (2017)

Absorpsi CO_2 di dalam *packed column* dengan spesifikasi yang berbeda-beda diuji pada tekanan rendah dan tinggi menggunakan berbagai macam jenis amine (konvensional dan baru) yaitu: *Monoethanolamine* (MEA), *Diethanolamine* (DEA), *Methyldiethanolamine* (MDEA), *2-amino-2-methyl-1-propanol* (AMP), *Piperazine* (PZ), *N,N-diethanolamine* (DEEA), *4-diethylamino-2-butanol* (DEAB), *diethylenetriamine* (DETA), dan *1-dimethylamino-2-propanol* (1DMA2P).

Berdasarkan *review* pada $K_{\text{GCO}_2\text{a}_v}$ terkait dengan pelarut amine pada absorpsi di dalam *packed column*, telah dilakukan *review* mengenai penentuan eksperimental $K_{\text{GCO}_2\text{a}_v}$, yang sebelumnya dilakukan oleh peneliti. Dengan mengukur CO_2 konsentrasi dalam fase gas sepanjang ketinggian kolom absorber dan menggunakan teori dua-film, $K_{\text{GCO}_2\text{a}_v}$ diperoleh untuk kolom dengan material *packing* acak dan beraturan. Rincian data *pilot-plant* terkait dengan penentuan $K_{\text{GCO}_2\text{a}_v}$ telah dilaporkan, dan penentuan $K_{\text{GCO}_2\text{a}_v}$ telah ditinjau untuk berbagai amina pelarut (amine konvensional, amine hibrid, dan amine yang baru dikembangkan) melalui berbagai parameter operasi tekanan rendah dan tinggi pada kolom absorber.

Review untuk proses absorpsi CO_2 pada tekanan tinggi dari penelitian Abdul Halim, dkk., eksperimen dilakukan untuk menghilangkan CO_2 dari campuran CO_2 dan metana menggunakan larutan MEA di bawah tekanan 50 bar. Percobaan dilakukan dalam *packed column* (tinggi *packing* 2,04 m; diameter kolom 0,046 m) dengan jenis *packing* kasa Sulzer, yang memiliki luas permukaan sekitar $500 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$. Tujuan percobaan mereka adalah untuk menentukan $K_{\text{GCO}_2\text{a}_v}$ dan efisiensi CO_2 *removal* di bawah tekanan tinggi. Nilai $K_{\text{GCO}_2\text{a}_v}$ diperoleh pada CO_2 tetap dengan konsentrasi 20% mol, konsentrasi amina berkisar $1 - 4 \text{ kmol m}^{-3}$, kisaran kecepatan laju alir amine dari $4,51 - 8,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ jam}^{-1}$, kisaran laju alir gas $18,89 - 35,08 \text{ kmol m}^{-2} \text{ jam}^{-1}$, dan kisaran suhu umpan yaitu

pada 27°C hingga 45°C. Kemudian dilakukan pula validasi keandalan eksperimen oleh Maneeintr, dkk. di bawah kondisi tekanan rendah. Hasil mereka menunjukkan bahwa tinggi tekanan, laju alir amine, dan konsentrasi amine memberikan efek signifikan pada nilai $K_{GCO_2a_v}$ dan dengan meningkatkan parameter ini, nilai $K_{GCO_2a_v}$ akan meningkat. Mereka juga menunjukkan bahwa nilai $K_{GCO_2a_v}$ tidak dipengaruhi oleh laju alir gas dan titik optimal untuk suhu aliran masuk amine ke kolom absorpsi ditemukan sebesar 40°C. Halim, dkk., juga melakukan eksperimen untuk menghilangkan CO₂ dari campuran CO₂ dan metana menggunakan larutan AMP – PZ di dalam *packed column* (tinggi *packing* 2,04 m; diameter kolom 0,046 m) dengan jenis *packing* kasa Sulzer. Tujuan dari mereka pekerjaan adalah untuk menentukan nilai $K_{GCO_2a_v}$ di bawah tekanan tinggi (10 – 40 bar). Nilai $K_{GCO_2a_v}$ diperoleh pada CO₂

Data yang didapatkan dari eksperimen absorpsi CO₂ pada tekanan rendah adalah sebagai berikut:

II.8 Tinjau Korelasi Empiris yang Dikembangkan dari $K_{GCO_2a_v}$ Dalam *Packed Column Absorber* Bertekanan Rendah

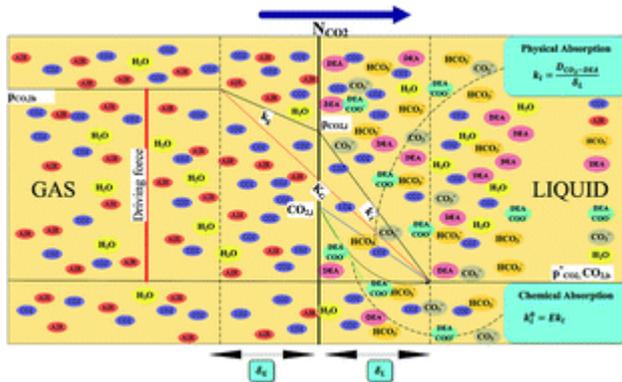
Solvent	Packing type	Ref.	Correlations
MEA	Ceramic rings, glass rings, steel rings and ceramic saddles	(Kohl and Riesenfeld, 1985)	$K_G a_e = F \left(\frac{L}{\mu} \right)^{2/3} \left[1 + 5.7(\alpha - \alpha_e) M e^{0.0067(-1.42P)} \right]$
MEA	16 mm Pall rings, IMTP-15 and 4A Gempak	(Demontigny <i>et al.</i> , 2001)	$K_G a_e = 0.731(L)^{1/2} \left[(\alpha - \alpha_e) \frac{M}{P_{CO_2}} \right] + 0.0061$
AMP	EX	(Aroonwilas and Tontiwachuthikul, 1998)	$K_G a_e = 2.11(L)^{1/2} \left[(\alpha - \alpha_e) \frac{M}{P_{CO_2}} \right] + 0.0193$
MEA	DX	(Setameteekul <i>et al.</i> , 2006)	$K_G a_e = 4.106 - 0.370A - 0.077B + 0.044C - 0.001758D - 4.74E + 0.00215A^2 + 0.004B^2 - 0.00162C^2 + 6.105E^3 - 0.024C + \dots$
MEA-AMP	DX	(Dey and Aroonwilas, 2009)	$K_G a_e = k_{amine} e^{A \left(\frac{AMP}{MEAN} \right)} e^{B_0 e^{C \alpha_0}} L^{1.0} e^{E C_0} e^{F/T}$
DEAB	DX	(Sema <i>et al.</i> , 2013)	$K_G a_e = (L)^{0.65} \left[(\alpha - \alpha_e) \frac{M}{P_{CO_2}} \right] + 0.0071$
MEA	Dixon rings	(Fu <i>et al.</i> , 2012)	$K_G a_e = (L/\mu)^{0.67} [0.00805(\alpha - \alpha_e) M] e^{(0.0067-3AP_{CO_2})} - 0.0002213$
DETA	Dixon rings	(Fu <i>et al.</i> , 2012)	$K_G a_e = (L)^{0.67} (C)^{0.08} \left[0.752(\alpha - \alpha_e) \frac{M}{P_{CO_2}} \right] + 0.142$
MEA-MDEA	DX	(Naami <i>et al.</i> , 2013)	$K_G a_e = k_{amine} e^{A \left(\frac{MDEA}{MEAN} \right)} e^{B_0 e^{C \alpha_0}} L^{1.0} e^{E C_0} e^{F/T}$
IDMA2P	Dixon rings	(Wen <i>et al.</i> , 2015)	$K_G a_e = 0.023(L)^{0.44} [23.943(\alpha - \alpha_e) \frac{M}{P_{CO_2}}] + 0.2062$
NH ₃	Packing with diversion windows	(Li <i>et al.</i> , 2014)	$K_G a_e = 0.0767(L)^{0.42} (M)^{0.693} / \mu_{CO_2}^{0.194}$
DEEA	Dixon ring	(Xu <i>et al.</i> , 2016)	$K_G a_e = 0.2526(L)^{0.171} (\alpha - \alpha_e) \frac{M^{0.2461}}{P_{CO_2}^{0.33}} - 0.0074$
DEEA	DX		$K_G a_e = 0.5718(L)^{0.18} (\alpha_e - \alpha) \frac{M}{P_{CO_2}} + 0.0489$

Kedua, kami telah meninjau dan menggambarkan efek parameter operasi pada $K_{GCO_2a_v}$ data dalam kolom yang diserap absorber. Dalam kebanyakan penelitian, penulis menunjukkan

bahwa nilai $K_{GCO_2a_v}$ tidak terpengaruh oleh aliran gas tingkat, dan dengan meningkatkan laju liquidow cairan, konsentrasi amina, dan tekanan kolom, nilai $K_{GCO_2a_v}$ meningkat. Meningkatkan pemuatan amina dan tekanan parsial CO_2 dalam umpan gas menyebabkan penurunan $K_{GCO_2a_v}$. Ketiga, kami punya meninjau korelasi empiris yang dikembangkan dari $K_{GCO_2a_v}$ untuk penyerap kolom bertekanan rendah. Korelasi yang paling berkembang adalah fungsi parameter operasi penyerap kolom dan agak bergantung pada sifat fisik tersebut sebagai viskositas. Perlu dicatat bahwa korelasi yang berkembang, yang ditinjau dalam penelitian ini, hanya berdasarkan pada spesifikasi.

II.6.2 Hassan Pashaei, Ahad Ghaemi dan Masoud Nasiri (2016)

Dalam penelitian ini, tingkat penyerapan kimia dan kelarutan karbon dioksida ke dalam larutan berair DEA diselidiki dalam kolom gelembung pengaduk. Percobaan meliputi molaritas DEA, tekanan parsial CO_2 dan kecepatan pengaduk masing-masing 0,2-2,0 M, 300–450 kPa dan 0–600 rpm. DEA dan konsentrasi CO_2 dan laju aliran gas-cair berpengaruh pada kinerja transfer massa diukur dalam hal efisiensi penangkapan CO_2 , pembebanan, transfer massa fluks dan koefisien perpindahan massa. Model termodinamik, menurut model GE Pitzer disediakan untuk kelarutan ekuilibrium CO_2 dalam larutan berair DEA. Hasilnya menunjukkan bahwa pemuatan CO_2 dalam kisaran 0,16-0,40 dan laju transfer massa dalam kisaran $0,36 \times 10^{-5}$ hingga $0,97 \times 10^{-5}$ kmol m⁻² s⁻¹ meningkat dengan konsentrasi DEA dan tekanan parsial CO_2 . Juga hasilnya menunjukkan bahwa kuantitas kl meningkat dengan penambahan konsentrasi DEA, laju aliran cairan dan gas. Parameter film meningkat dengan meningkatnya konsentrasi DEA dan menurun dengan meningkatnya tekanan parsial CO_2 . Persentase penyerapan CO_2 bervariasi dalam kisaran 30-57%. Tingkat penyerapan maksimum CO_2 pada tekanan parsial 45 kPa telah memperoleh 1,8 g min⁻¹ ketika konsentrasi DEA adalah 2,0 M.



Gambar II. 4 Proses Perpindahan CO₂ gas menuju liquid (absorben)

II.6.3 Hamadi Cherif, Christophe Coquelet dkk. 2016

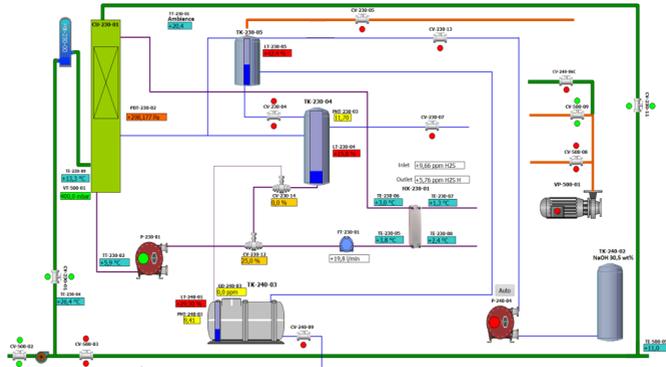
Biogas adalah teknologi yang menjanjikan yang dapat digunakan sebagai bahan bakar kendaraan, untuk produksi panas dan listrik, atau disuntikkan dalam jaringan gas nasional. Ini dapat disimpan, diangkut, tidak terputus-putus dan disubstitusikan untuk bahan bakar fosil. Gas ini dihasilkan dari air limbah pengobatan dengan degradasi bahan organik di bawah anaerobik kondisi terutama terdiri dari metana dan karbon dioksida. Menjadi digunakan sebagai bahan bakar terbarukan, biogas, yang energinya hanya berasal dari metana, harus dimurnikan dari karbon dioksida dan kotoran lainnya seperti uap air, siloxanes dan hidrogen sulfida. Pemurnian biogas untuk aplikasi ini secara khusus membutuhkan penghapusan hidrogen sulfida, yang secara negatif mempengaruhi operasi dan kelangsungan hidup peralatan terutama pompa, penukar panas dan pipa, menyebabkan korosi mereka. Beberapa metode tersedia untuk menghilangkan hidrogen sulfida dari biogas. Di sini, penyerapan reaktif dalam kemasan tersusun kolom dengan cara penyerapan kimia dalam natrium berair solusi hidroksida dipertimbangkan. Penelitian ini didasarkan pada simulasi menggunakan Aspen Plus™ V8.0, dan perbandingan dilakukan

dengan data dari sebuah pabrik percontohan industri merawat 85 Nm³/ jam biogas yang mengandung sekitar 30 ppm hidrogen sulfida. Pendekatan model berbasis tarif telah digunakan untuk simulasi untuk menentukan efisiensi pemisahan untuk berbagai kondisi pengoperasian. Untuk menggambarkan vaporliquid ekuilibrium, pendekatan γ / ϕ telah dipertimbangkan:

Model NRTL elektrolit telah diadopsi untuk mewakili non-idealitas dalam fase cair, sementara persamaan negara Redlich-Kwong memiliki telah digunakan untuk fase uap. Untuk memvalidasi model termodinamika, konstanta hukum Henry dari setiap senyawa di air telah diverifikasi terhadap data eksperimen. Nilai default tersedia di Aspen Plus™ V8.0 untuk properti komponen murni sifat-sifat sebagai kapasitas panas, densitas, viskositas dan tegangan permukaan juga telah diverifikasi. Hasil yang diperoleh untuk fisik dan sifat kimia dalam perjanjian yang baik dengan data eksperimen.

Reaksi yang terlibat dalam proses telah dipelajari dengan teliti. Konstanta kesetimbangan untuk reaksi kesetimbangan dan laju reaksi konstan untuk reaksi yang dikontrol secara kinetik antara karbon dioksida dan ion hidroksida telah diperiksa. Hasil dari simulasi bagian pemurnian pabrik percontohan menunjukkan pengaruhnya suhu rendah, konsentrasi natrium hidroksida dan parameter hidrodinamik pada penyerapan selektif hidrogen sulfida. Hasil ini menunjukkan tingkat akurasi yang dapat diterima saat dibandingkan dengan data eksperimen yang diperoleh dari pilot plant.

Hasil menunjukkan juga efisiensi yang luar biasa dari natrium hidroksida untuk penghilangan hidrogen sulfida. Kandungan senyawa ini dalam gas meninggalkan kolom di bawah 1 ppm.



Gambar II. 5 Diagram skematis dari sistem untuk menghilangkan hidrogen sulfida

(HALAMAN SENGAJA DIKOSONGKAN)

BAB III

METODE PENELITIAN

III.1 Deskripsi Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari pengaruh bermacam-macam variabel operasi terhadap kinerja *packed column* untuk absorpsi CO₂ ke dalam larutan MDEA berpromotor MSG. Penelitian ini dilakukan secara eksperimen, dimana kinerja *packed column absorber* ditinjau dari nilai % *removal* dari CO₂ dan CO₂ *loading*.

III.2 Rancangan Percobaan

III.2.1 Penetapan Variabel

- Variabel Tetap
 1. Tekanan : 1 atmosfer
 2. Temperatur : 30°C
 3. Gas Umpan : campuran 20% CO₂ + 80% N₂ *flowrate* 30 Liter/menit
 4. Pelarut : Larutan MDEA 40% berat total pelarut
 5. Jenis promotor : *Monosodium Glutamate* (MSG)

- Variabel Bebas

Variabel bebas pada penelitian ini adalah *flowrate*, komposisi promotor dan konsentrasi promotor. Variabel bebas yang dimaksud dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

1. Komposisi promotor dalam larutan yaitu 0%, 1%, 2%, dan 3% berat dari berat total larutan.
2. *Flowrate* pelarut MDEA dengan promotor MSG yaitu 1, 2, dan 3 L/menit

III.3 Bahan dan Alat yang Digunakan

III.3.1 Bahan yang Digunakan

1. Campuran Gas CO₂ 20% + N₂ 80%
(PT. Samator Gas Industri, 2018)

2. MDEA

Spesifikasi *Methyldiethanolamine*

Kemurnian : 99%

Properties MDEA

Rumus molekul : $C_5H_{13}NO_2$

Berat molekul : 119,169 gr/mol

Titik didih : 247,3°C

Kelarutan dalam air : 100%

Densitas : 1,038 gr/mL

Fase : Liquid

(PT Pertamina Persero, 2017)

3. *Monosodium Glutamate*

Spesifikasi MSG

Kemurnian : 99,47%

Properties MSG

Rumus molekul : $C_5H_8NNaO_4$

Berat molekul : 119,169 gr/mol

Densitas : 1,038 g/L

Titik leleh : 247,3°C

(PT. Ajinomoto-Mojokerto Factory, 2017)

4. Asam Klorida (HCl)

Spesifikasi Asam Klorida (Grade Extra Pure)

Kemurnian : 37%

Properties HCl

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

Expiration : Juni 2019

(Jurusan Teknik Kimia, 2018)

5. Indikator *Metil Orange* (MO)

Properties Metil Orange

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

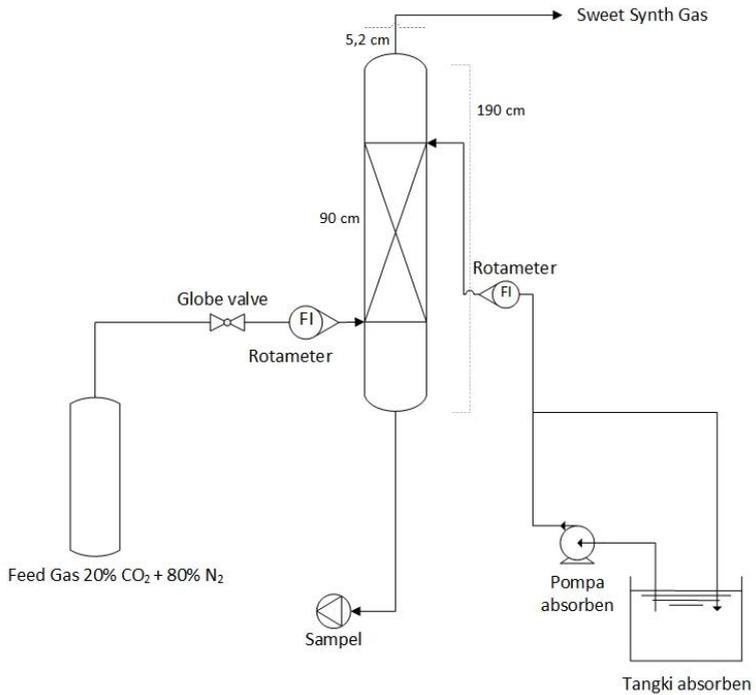
(Gudang T. Kimia, 2017)

III.3.2 Alat yang Digunakan

Peralatan yang digunakan untuk penelitian adalah :

- **Rangkaian *Packed Column Absorber***

Peralatan *Packed Column Absorber* yang digunakan memiliki tinggi kolom 150 cm dan diameter kolom 5,2 cm. Sedangkan untuk tipe *packing* yang digunakan adalah tipe *random packing*, dengan tinggi *packing* sebesar 90 cm. Resin *raschig ring* dengan ukuran diameter 5 mm digunakan untuk mengisi *packing*. Umpam gas masuk ke kolom melalui bagian bawah kolom dan aliran pelarut *Methyldiethanolamine* (MDEA)-*Monosodium Glutamate* (MSG) dialirkan ke kolom dari atas menggunakan pompa. Pelarut mengalir dari bagian atas kolom lalu akan mengalir melalui susunan *packing* sehingga terjadi kontak dan transfer massa antara fasa liquid dan gas yang masuk melalui lubang-lubang pada *raschig ring*. Selanjutnya, larutan yang keluar dari bawah kolom akan diambil sebagai sampel dan dianalisa.



Gambar III. 1 Skema Peralatan *Packed Column Absorber*

Spesifikasi peralatan *packed column absorber* :

- Ukuran Raschig ring : 5 mm
- Tinggi Raschig ring : 90 cm
- Tinggi kolom : 190 cm
- Diameter kolom : 5,2 cm
- Tipe *packing* : *Random packing*



Gambar III. 2 Raschig Ring pada *Packing* Kolom Absorber

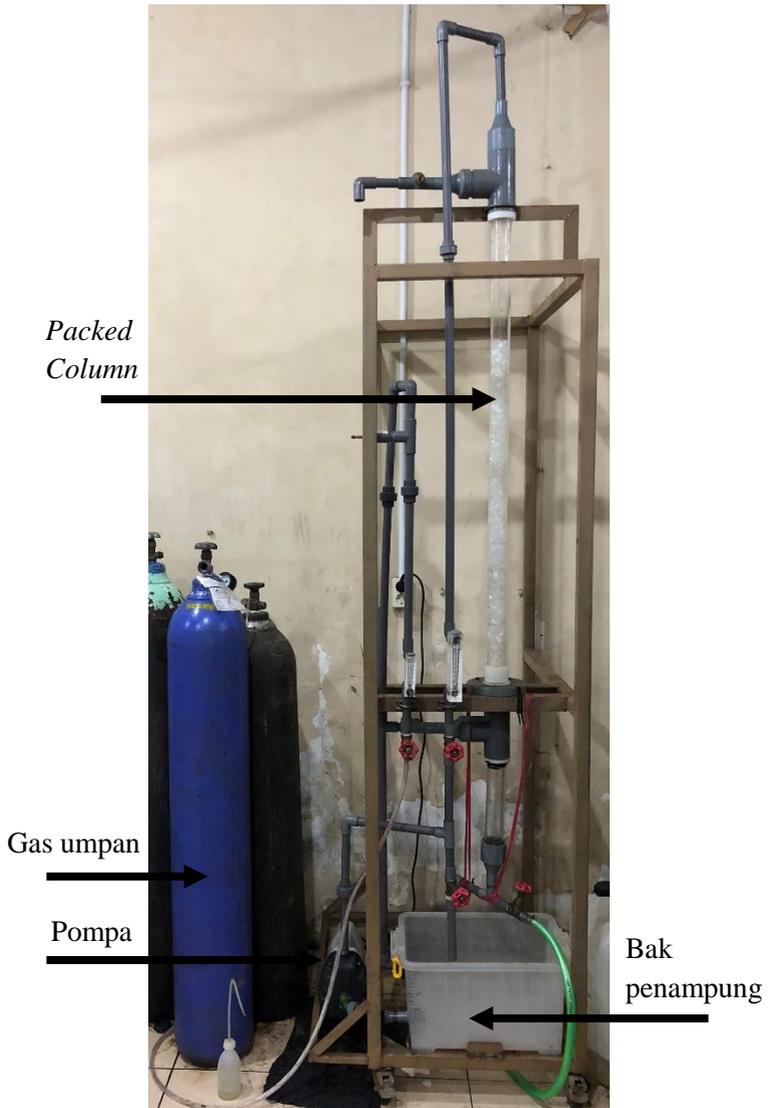
III.4 Langkah Percobaan

Prosedur Percobaan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

III.4.1 Tahap Persiapan Bahan dan Peralatan Percobaan

- a. Mempersiapkan bahan penelitian, berupa *synth* gas CO₂ 20% dan N₂ 80%, larutan MDEA 40% berat, *Monosodium Glutamate* (MSG), larutan HCl terstandarisasi, dan indikator MO.
- b. Melarutkan promotor ke dalam larutan MDEA sesuai variabel.
- c. Merangkai peralatan *Packed Column Absorber* sesuai skema **Gambar III.2**

- d. Mempersiapkan peralatan analisa titrasi *chittick* sesuai **Gambar III.**

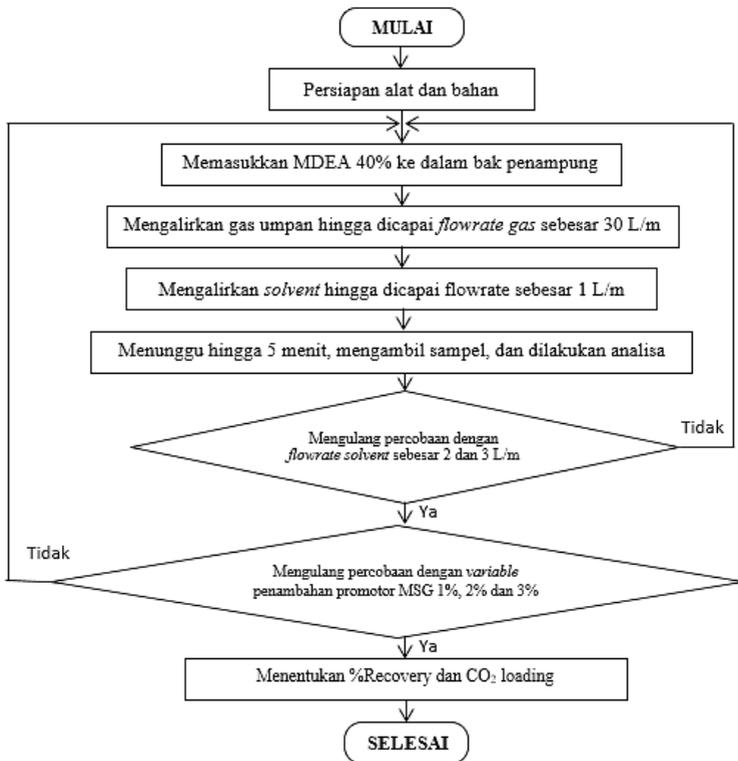


Gambar III. 3 Rangkaian *Packed Column Absorber* yang Digunakan

III.4.2 Tahap Pelaksanaan Percobaan Absorpsi CO₂

- a. Memasukkan larutan MDEA sesuai variabel ke dalam tangki absorben.
- b. Membuka *regulator* pada tabung gas umpan.
- c. Mensirkulasikan pelarut berpromotor sesuai variabel menggunakan pompa.
- d. Mengatur *flowrate* umpan gas dan pelarut sesuai dengan variabel.
- e. Menunggu eksperimen selama 5 menit/hingga kondisi operasi mencapai *steady state*.
- f. Mengambil sampel larutan *rich amine* dari *outlet* kolom ketika kondisi *steady state* telah tercapai.
- g. Menganalisa kandungan CO₂ dalam sampel *rich amine*.
- h. Melakukan langkah a hingga g dengan *flowrate* pelarut dan konsentasi promotor yang berbeda.

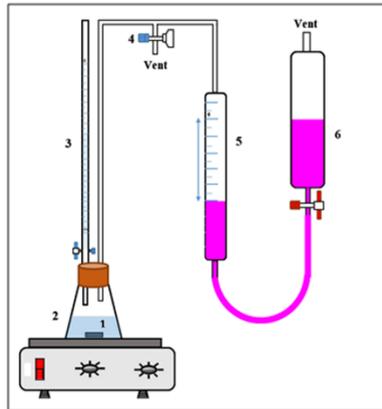
Tahap eksperimen secara sederhana ditunjukkan seperti diagram alir berikut



Gambar III. 4 Diagram Alir Percobaan

III.4.3 Analisa Sampel

Sampel liquid absorbent (rich amine) yang telah menyerap CO₂ akan dianalisa dengan metode titrasi *chittick* menggunakan larutan HCl terstandarisasi sebagai titran dengan indikator Methyl Orange (MO). Perubahan volume larutan dalam pipet ukur menunjukkan jumlah CO₂ yang terabsorb di dalam pelarut. Berikut merupakan skema alat untuk analisa sampel :



- Keterangan:
1. *Magnetic Stirrer*
 2. *Erlenmeyer*
 3. *Buret*
 4. *Stopcock*
 5. *Buret*
 6. *Pipet Ukur*
 7. *Fluid Reservoir*

Gambar III. 5 Skema Peralatan Analisa Titration *Chittick*

(A.B. Cerato, 1962)

III.4.4 Evaluasi Data

Data dari hasil analisa dengan metode titrasi asam-basa akan digunakan untuk menghitung CO_2 loading dari reaksi absorpsi CO_2 dalam MDEA berpromotor Monosodium Glutamate dan urea. CO_2 loading dari proses absorpsi dihitung mengikuti persamaan Hatcher (2009) sebagai berikut::

$$\text{CO}_2 \text{ loadings} = \frac{V_{\text{CO}_2 \text{ pada chittick}}}{22,4 \left(\frac{\text{mol}}{\text{volume}} \text{CO}_2 \right)} \frac{\text{mol}}{\text{mol MDEA masuk}}$$

Titration oleh asam kuat (HCl) ke dalam larutan MDEA yang telah menyerap CO_2 digunakan indikator *Methyl Orange* (MO) karena pada *range* pH MO (3,2) seluruh bikarbonat bereaksi menjadi gas CO_2 . Oleh karena itulah digunakan indikator MO untuk menganalisa kadar CO_2 pada sampel. (Hatcher, 2009)

Untuk menghitung % CO_2 removal:

$$\%CO_2 \text{ removal} = \frac{(CO_2 \text{ loading keluar} - CO_2 \text{ loading masuk}) \times \text{mol MDEA masuk/waktu}}{\text{mol } CO_2 \text{ masuk/waktu}} \times 100\%$$

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil eksperimen absorpsi CO₂ dalam larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) berpromotor *Monosodium Glutamate* (MSG) menggunakan *Packed Column*. Pada penelitian ini, absorben yang digunakan adalah larutan MDEA 40% berat dan Monosodium Glutamate (MSG) dengan spesifikasi food grade (purity 99.47%). Gas umpan yang digunakan adalah gas campuran (20% CO₂ dan 80% N₂) dengan laju alir 30 L/menit. Penelitian dilakukan pada kondisi tekanan 1 atmosfer dan pada suhu ruangan (30°C). Variasi konsentrasi promotor *Monosodium Glutamate* (MSG) yang digunakan sebagai variabel sebesar 0%, 1%, 2% dan 3% berat. Variabel lain yang diterapkan adalah laju alir pelarut, yaitu 1 Liter/menit, 2 Liter/menit, dan 3 Liter/menit. Pada waktu percobaan 5 menit kondisi *steady state* telah tercapai yang kemudian dijadikan acuan untuk menjalankan percobaan dalam penelitian ini.

Dari hasil percobaan, diperoleh sampel *rich amine* (absorben MDEA-MSG) yang telah menyerap CO₂ akan dianalisa dengan metode titrasi *chittick* menggunakan larutan HCl terstandarisasi sebagai titran dengan indikator Methyl Orange (MO). Besar CO₂ loading (mol CO₂/mol MDEA) pada larutan sampel akan dihitung.

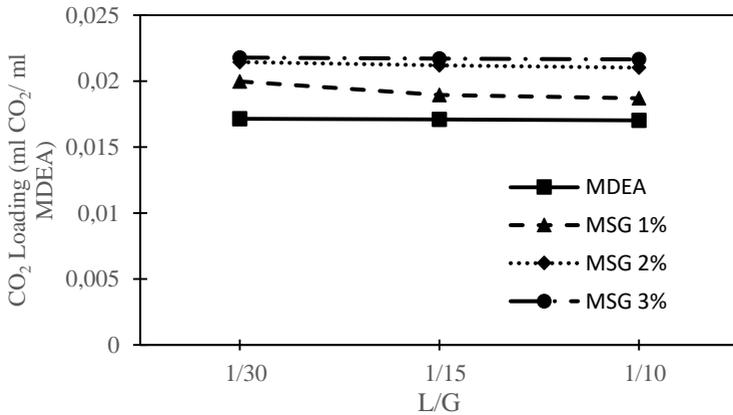
Dari hasil analisa diperoleh nilai CO₂ loading untuk masing-masing variabel percobaan seperti ditunjukkan pada **Tabel IV.1**. Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa *flowrate* pelarut dan konsentrasi promotor MSG berpengaruh terhadap besar CO₂ loading dan %recovery dari proses absorpsi CO₂ ke dalam pelarut.

Tabel IV.1 Analisa CO₂ *Loading* pada Konsentrasi Promotor dan *Flowrate* Pelarut Sesuai Variabel Eksperimen

Konsentrasi Promotor	Flowrate (L/m)	CO ₂ Loading (α)	% CO ₂ Removal
0%	1	0,017157	0,907
	2	0,017106	0,972
	3	0,017021	1,101
1%	1	0,019979	2,672
	2	0,018944	2,769
	3	0,018702	3,279
2%	1	0,021447	4,25
	2	0,021191	4,736
	3	0,021021	5,109
3%	1	0,021787	5,505
	2	0,021702	6,638
	3	0,021651	7,189

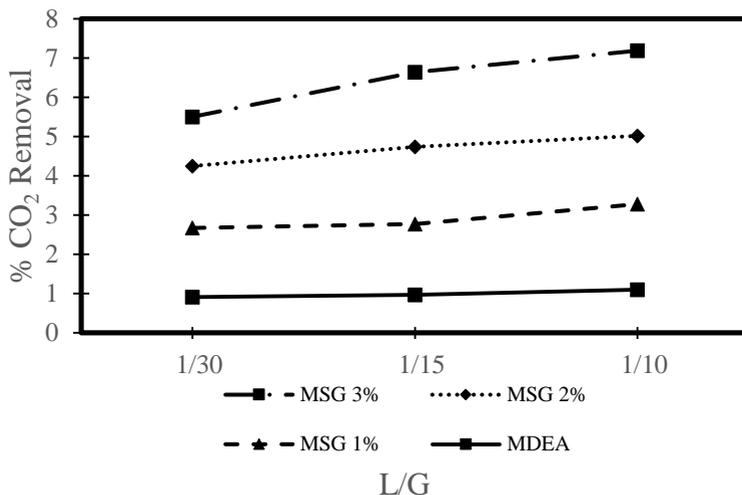
IV.1 Pengaruh Perubahan Laju Alir Absorben Terhadap CO₂ *Loading* dan %CO₂ *Removal*

Berdasarkan data hasil analisa percobaan yang diperoleh seperti ditunjukkan grafik pada **Gambar IV. 1**, terlihat bahwa laju alir pelarut; atau dapat dikatakan nilai L/G, berpengaruh terhadap besarnya CO₂ *loading*. Besar CO₂ *loading* akan menurun seiring kenaikan laju alir pelarut.



Gambar IV. 1 Grafik Hubungan CO_2 Loading dengan *Flowrate* Pelarut

Dari hasil analisa sampel, terlihat CO_2 loading justru semakin menurun seiring dengan meningkatnya rasio L/G. Hal ini dikarenakan laju alir umpan gas yang konstan sehingga terdapat *excess* pelarut dalam sampel yang diuji. Kenaikan rasio L/G dapat meningkatkan kinetika laju reaksi sehingga nilai CO_2 loading yang tinggi dapat tercapai. Namun, kecenderungan untuk meningkatkan laju alir di atas nilai optimum dapat mengakibatkan kerugian amine. (Afkhamipour dan Mofarahi, 2017).



Gambar IV. 2 Grafik Hubungan CO_2 Removal dengan Flowrate Pelarut

Pada **Gambar IV. 2** dapat dilihat bahwa peningkatan rasio L/G berpengaruh terhadap % CO_2 removal dari proses absorpsi. Terlihat dari hasil analisa, % CO_2 removal mencapai titik optimal pada rasio L/G 0,1 dengan variabel promotor 3%. Begitu pula untuk variabel promotor yang lain, nilai % CO_2 removal akan meningkat seiring dengan naiknya rasio L/G. Hal ini dikarenakan seiring dengan naiknya rasio L/G maka semakin banyak molekul MDEA yang aktif berkontak dengan gas CO_2 sehingga jumlah molekul CO_2 yang berdifusi dan bereaksi dengan pelarut juga semakin banyak. Berdasarkan ulasan dari Afkhamipour dan Mofarahi (2014) mengenai performa transfer massa absorpsi CO_2 dengan pelarut amine menyatakan bahwa, meningkatnya performa transfer massa oleh besarnya laju alir pelarut dikarenakan peningkatan jumlah molekul amine aktif yang bebas untuk absorpsi CO_2 yang maksimal. Selain itu, peningkatan koefisien

perpindahan massa pada fase liquid mengurangi tahanan transfer massa pada fase liquid yang mengakibatkan koefisien transfer massa pada fase gas akan meningkat, sehingga nilai %CO₂ removal akan semakin besar.

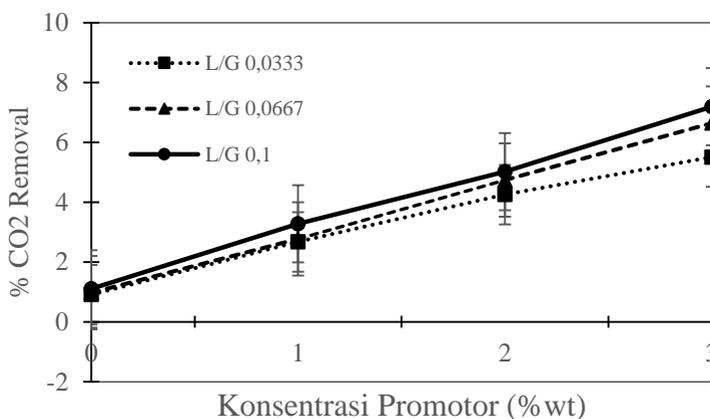
Umumnya, dalam *packed column* area perpindahan massa lebih kecil dari pada luas area permukaan *packing* yang sesungguhnya. Dalam hal ini, parameter yang paling penting dalam area perpindahan massa adalah perbandingan L/G, tegangan permukaan liquid, dan konstruksi *packing*. Permukaan basah pada *packing* dan area perpindahan massa akan meningkat seiring dengan meningkatnya perbandingan L/G. Fenomena ini terklarifikasi oleh Penelitian Saadat (2009) tentang eksperimen dan permodelan absorpsi dengan reaksi kimia CO₂ oleh *alkanolamine* pada *packed bed* yang dalam kasus ini digunakan MEA ditunjukkan *outlet* gas CO₂ semakin kecil seiring dengan meningkatnya L/G. Hal ini juga dapat diartikan bahwa %CO₂ removal akan meningkat bersamaan dengan meningkatnya laju alir pelarut.

Laju alir yang digunakan dalam percobaan ini cenderung tinggi sehingga menyebabkan nilai CO₂ loading semakin turun karena *excess* pelarut yang tinggi. Sedangkan dengan meningkatkan laju alir pelarut pada eksperimen mampu meningkatkan %CO₂ removal hingga 50-70% dari percobaan dengan rate terendah pada masing-masing variabel konsentrasi promotor.

IV.2 Pengaruh Kenaikan Konsentrasi Promotor Terhadap Nilai CO₂ Loading dan %CO Removal

Nilai CO₂ loading yang didapatkan dari eksperimen absorpsi ditunjukkan dengan grafik pada **Gambar IV. 4**. Berdasarkan data hasil analisa yang diperoleh seperti ditunjukkan grafik pada **Gambar IV. 4**, terlihat pula bahwa konsentrasi

promotor berpengaruh terhadap besarnya CO_2 loading. Besar CO_2 loading akan meningkat seiring kenaikan konsentrasi promotor dan menunjukkan hasil terbaik pada konsentrasi 3% MSG dengan laju alir 1 Liter/menit. Namun pada percobaan dengan konsentrasi MSG 1-3% berat, CO_2 loading dari proses absorpsi menunjukkan kenaikan dengan sedikit sekali perbedaan. Hal ini disebabkan karena absorpsi yang terjadi berlangsung sangat cepat sehingga efek dari kinetika reaksi tidaklah signifikan dan hanya transfer massa secara difusi yang terjadi (Pudjiastuti, 2015).



Gambar IV. 4 Grafik Hubungan CO_2 Loading dengan Konsentrasi Promotor

Dari **Gambar IV. 4** terlihat bahwa untuk semua laju alir pelarut, absorpsi menggunakan MDEA dengan penambahan MSG memiliki nilai CO_2 loading yang lebih besar dibandingkan dengan absorpsi dengan pelarut MDEA tanpa promotor. Selain itu, dapat dilihat pada **Gambar IV. 5** bahwa % CO_2 removal juga akan naik seiring dengan naiknya konsentrasi promotor. Hal ini terjadi karena penambahan MSG sebagai promotor dalam pelarut MDEA akan bereaksi dengan CO_2 selayaknya *alkanolamine* primer yang

MDEA juga ikut meningkat (Pudjiastuti, 2015). Asam amino merupakan promotor yang efektif untuk reaksi penyerapan CO₂ karena senyawanya yang bersifat basa lewis dengan kebasaaan tidak terlalu kuat ini sangat reaktif untuk bereaksi terhadap CO₂ (Thee, 2013).

MSG (*Monosodium Glutamate*) merupakan senyawa garam-asam amino primer paduan antara *Glutamic Acid* dan basa *Sodium* Hidroksida, dimana berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Majchrowcz (2014), asam amino *glutamic acid* dengan paduan basa *Potassium* Hidroksida menunjukkan reaktivitas kimia terhadap CO₂ yang besarnya sama seperti larutan *alkanolamine* primer (MEA). *Alkanolamine* primer memiliki laju absorpsi CO₂ yang lebih cepat dibandingkan MDEA. Sebagai *alkanolamine* primer layaknya MEA, MSG menyediakan sepasang elektron bebas dalam molekulnya yang membuat MEA sangat reaktif terhadap CO₂ (Thee, 2013).

Berbeda dengan *alkanolamine* primer dan sekunder yang membentuk karbamat ketika bereaksi dengan CO₂, MDEA sebagai *alkanolamine* tersier bereaksi dengan CO₂ membentuk ion bikarbonat. *Alkanolamine* tersier memiliki perbandingan mol 1:1 dengan CO₂ saat terjadi reaksi absorpsi sehingga memiliki kemampuan absorpsi yang lebih baik dari *alkanolamine* primer dan sekunder. Akan tetapi dikarenakan kurangnya ikatan N-H pada strukturnya menyebabkan laju absorpsi pada *alkanolamine* tersier menjadi berkurang sehingga perlu dikombinasikan dengan garam-asam amino atau *alkanolamine* dengan tipe primer atau sekunder (Thee, 2013). Oleh karena itu, penambahan MSG dapat memperbesar laju absorpsi MDEA tanpa mengurangi kelebihan yang dimiliki oleh MDEA sebagai *alkanolamine* tersier.

Berdasarkan hasil eksperimen, pada temperatur laju alir 3 L/menit dengan penambahan konsentrasi MSG dari rentang 0-3% mengalami peningkatan CO₂ *loading* sebesar 27%. Secara keseluruhan, CO₂ *loading* mengalami kenaikan sebesar 28% dari

nilai terendah pada keadaan konsentrasi 0% MSG dengan laju alir 3 L/menit hingga nilai tertinggi pada keadaan konsentrasi 3% MSG dengan laju alir 1 L/menit.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa CO_2 loading dari proses absorpsi CO_2 ke dalam larutan MDEA 40% berat berpromotor MSG dengan temperatur 30°C (suhu ruang) memiliki nilai antara 0.017-0.022. Perbandingan secara tidak langsung antara nilai CO_2 loading hasil eksperimen dengan literature dan penelitian sebelumnya ditunjukkan seperti pada tabel di bawah:

Tabel IV. 2 Nilai CO₂ *Loading* dari Literature

Konsentrasi Amine (%berat)	Temperatur (°C)	Acid Gas Loading	Sistem	Referensi
23.4, 48.9	25, 40, 70, 100, 120	0.001 – 3.22	CO ₂ – MDEA – H ₂ O	Jou, dkk. (1982)
11.8, 20, 23.3	25, 37.8, 50, 65.6, 115.6	0.157 – 1.0	CO ₂ – MDEA – H ₂ O	Maddox, dkk. (1987)
35	40, 100	0.0001 – 0.79	H ₂ S – CO ₂ – MDEA – H ₂ O	Jou, dkk. (1983a)
35	40, 100	0.002 – 0.8	CO ₂ – MDEA – H ₂ O	Jou, dkk. (1983b)
48.9	40, 100	0.0004 – 0.97	H ₂ S – CO ₂ – MDEA – H ₂ O	Jou, dkk. (1997)
23.3, 48.9	40	0.006 – 0.842	CO ₂ – MDEA – H ₂ O	Austgen, dkk. (1991)
23.3	40	0.12 – 0.97	CO ₂ – MDEA – H ₂ O	MacGregor dan Mather (1991)

(Patil, 2006)

BAB V KESIMPULAN

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian kinetika reaksi absorpsi karbon dioksida (CO_2) kedalam larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) berpromotor *Monosodium Glutamate* (MSG) menggunakan peralatan *Packed Column* dengan konsentrasi MDEA sebesar 40% berat pada temperatur 30°C dan tekanan 1 atm, dapat disimpulkan bahwa :

1. Semakin tinggi *flowrate* absorben, maka CO_2 *loading*-nya semakin rendah, Pada *flowrate* 2 L/m dan konsentrasi promotor 3% ($0,00085 \text{ molCO}_2/\text{mol MDEA}$) CO_2 *loading*-nya lebih rendah daripada *flowrate* 1 L/m ($0,00171 \text{ molCO}_2/\text{mol MDEA}$) hal ini dikarenakan adanya *excess* pada MDEA yang digunakan. Sedangkan efisiensi penghilangan CO_2 semakin meningkat. Hal ini dilihat pada percobaan MDEA berpromotor MSG 3% dan *flowrate* absorben 2 L/menit memiliki % CO_2 *removal* sebesar 6,6381%.
2. Semakin tinggi konsentrasi promotor (MSG), semakin tinggi pula efisiensi penghilangan CO_2 dan CO_2 *loading*-nya. CO_2 *loading* tertinggi pada konsentrasi promotor 3% dengan *flowrate* 1L/menit, yaitu $0,021787 \text{ mol CO}_2/\text{mol MDEA}$ dan % CO_2 *removal*-nya tertinggi pada konsentrasi promotor 3% dengan *flowrate* 3L/m, yaitu 7,1886%.

V.2 Saran

Adapun saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah:

1. Melakukan studi kinetika proses absorpsi CO₂ ke dalam larutan MDEA berpromotor *monosodium glutamate* untuk mendapatkan kinetika laju reaksi penyerapan CO₂.
2. Perlu adanya metode analisa lain untuk mengukur kadar CO₂ dalam gas dan *liquid* yang keluar dari *packed column absorber*

DAFTAR PUSTAKA

- Aresta M., dkk. (2013). *The Changing Paradigm in CO₂ Utilization*. J CO₂ Util;3:65e73.
- 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.
- Buckingham, P., (1964). *Fluor solvent process plants: how they are working*. Hydrocarbon Process, 43, 113.
- Cerato, A.B. (1962). *Determination of Soil Carbonate Content (Chittick Apparatus)*. Oklahoma: University of Oklahoma.
- Danckwerts, P.V. (1970). *Gas-liquid reactions*. New York: McGraw-Hill.
- 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.
- Frauenkron, M., Melder, Johann-Peter, R. Gunther, R. Roszbacher, and Hoke H., (2002). *Ethanolamines and propanolamines. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*. BASF Aktiengesellschaft, Ludwigshafen, Germany : John Wiley and Sons, Inc.
- Gorak, A. (2005). *European roadmap for process intensification: reactive absorption*. Ohio: Velocys Inc.
- Haimour, N., and Sandall, O.C. (1987). *Absorption of carbon dioxide into aqueous Methyl-diethanolamine*. Chemical Engineering Science, 39 (12), 1791-1796.
- Irazoqui H. A., dkk. (1993). *Simulation of a Urea Synthesis Reactor*. Ind Eng Chem Res : 32(11):2671e80.
- Kalika, Mallikarjuna. (2014). *A project report on experimental investigation of CO₂ absorption in a packed bed tower*.

Department of Chemical Engineering National Institute of Technology Rourkela.

- 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.
- Koohestanian, Esmail, dkk. (2017). *A Novel Process For CO₂ Capture From The Flue Gases To Produce Urea and Ammonia*. Department of Chemical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran : Elsevier.
- 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.
- Ma'mun, S. (2005). *Selection and characterization of new absorbents for carbon dioxide capture (Doctoral Thesis)*. Norway: Norwegian University of Science and Technology
- Maxwell G. (2004). *Synthetic Nitrogen Products: A Practical Guide to the Products and Processes*. Springer Science & Business Media.
- Pawlak, H. K., Siemenc, M., Chacuk, A. (2011). *Reaction kinetics of CO₂ in aqueous methyldiethanolamine solutions using the stopped-flow technique*. Chemical and Process Engineering, 33(1), 7-18.
- PT. Ajinomoto-Mojokerto Factory.(2017). *Material Safety Data Sheet Monosodium Glutamate*.
- PT. Pertamina Persero. (2017). *Material Safety Data Sheet Metyl Dietanol Amine*.
- Rao, A.B., and Rubin, E.S. (2002). *A technical, economic, and environmental assessment of amine-based CO₂ capture technology for power plant greenhouse gas control (Technical Progress Report)*. West Virginia: National Energy Technology Laboratory
- Sumber Ilmiah Persada, UD. (2018) *Material Safety Data Sheet HCl 37%*.

- Servatius, B.A. (2012). *Absorpsi gas CO₂ melalui kontaktor membran serat berongga menggunakan larutan penyerap tunggal dan campuran senyawa amina: pengaruh laju alir CO₂*. 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.
- Thee, H. et.al. (2013). *A kinetic study of CO₂ capture with potassium carbonate solutions promoted with various amino acids: Glycine, sarcosine and proline*. Australia: The University of Melbourne
- Wang, M., Lawal, A., and Stephenson, P., (2011). *Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: a state-of-the-art review*. Chemical Engineering Research and Design, 89, 1609-1624.
- 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.
- https://www.academia.edu/8259964/Tugas_umum

DAFTAR NOTASI

MW	Berat molekul	(kg/ kmol)
C	Konsentrasi gas pada permukaan liquid	(mol/L)
C_{A^o}	Konsentrasi CO ₂ dalam bulk liquid pada inlet	(mol/L)
C_{Ai}	Konsentrasi CO ₂ pada interface	(mol/L)
C_{B^o}	Konsentrasi MDEA dalam bulk liquid pada inlet	(mol/L)
$C_{B,B}$	Konsentrasi MDEA dalam bulk liquid pada kolom bawah	(mol/L)
$C_{B,T}$	Konsentrasi MDEA dalam bulk liquid pada kolom atas	(mol/L)
C_O	Konsentrasi gas dalam bulk gas	(mol/L)
D	Difusivitas gas dalam larutan	(m ² / s)
F_L	Flowrate liquid	(L / s)
h	Tinggi kolom	(m)
k	Faktor proporsionalitas	(m/s)
k_L	Koefisien transfer massa liquid	-

K	Konstanta model	-
K_1	Konstanta kesetimbangan reaksi	(s^{-1})
K_2	Konstanta kesetimbangan reaksi	(s^{-1})
K_3	Konstanta kesetimbangan reaksi	(s^{-1})
K_4	Konstanta kesetimbangan reaksi	(s^{-1})
K_{ga}	Koefisien perpindahan massa overall badan gas	-
K_{La}	Koefisien perpindahan massa overall badan liquid	-
K_{MDEA}	Konstanta kesetimbangan reaksi	(s^{-1})
K_w	Konstanta kesetimbangan reaksi	(s^{-1})
N_A	Laju absorpsi CO_2	(mol/m ² s)
P	Tekanan atmosferik	(atm)
r	Laju reaksi	(mol / L s)
\bar{R}	Laju Absorpsi	(mol / m ² s)
s	Luas permukaan kolom	(m ²)
S	Luas area penampang	(m ²)
T	suhu	(°C)

V	volume	(cc)
Z	Ketinggian kolom	(m)
δ	Ketebalan stagnant film	(mm)
τ	Rata-rata waktu expose	(s)

LAMPIRAN

APPENDIKS A

A. Perhitungan Kebutuhan Pelarut

Kebutuhan pelarut dan promotor untuk setiap variabel percobaan dihitung dengan ketentuan sebagai berikut:

Densitas MDEA : 1,038 gr/cm³

Densitas MSG : 1,62 gr/cm³

Densitas Aquadest : 1 gr/cm³

Laju alir gas : 20 L/menit

Ukuran Raschig ring : 5 mm

Tinggi Raschig ring : 90 cm

Tinggi kolom : 190 cm

Diameter kolom: 5,2 cm

- Asumsi waktu yang dibutuhkan untuk *steady state* :
5 menit

Pengambilan waktu sampel dilakukan setelah 5 menit sebanyak 3x ketika keadaan *steady state*, sehingga waktu total running teoritis adalah 5 menit.

- Untuk laju alir liquid (absorben) : 1 L/menit
Kebutuhan pelarut teoritis = flowrate absorben x waktu total running
= 1 L/menit x 5 menit = 5 L

Dengan excess 100%, kebutuhan pelarut untuk satu variable konsentrasi dan satu variable rasio perbandingan berat MSG adalah 5L.

Karena ada 4 variabel konsentrasi, maka kebutuhan pelarut total untuk laju alir liquid 1L/menit = 4 x 5 L = 20 L

Tabel A.1 Persentase Berat Pelarut tiap Variabel

Variabel No.	Konsentrasi Promotor Campuran	Konsentrasi MDEA	Konsentrasi MSG	Konsentrasi Aquadest
1	0%	40%	0%	60%
2	1%	40%	1%	59%
3	2%	40%	2%	58%
4	3%	40%	3%	57%

*% menunjukkan % berat

- Perhitungan densitas campuran larutan:

$$\frac{1}{\rho_{campuran i}} = \frac{\%MDEA}{\rho_{MDEA}} + \frac{\%MSG}{\rho_{MSG}} + \frac{\%Aquadest}{\rho_{Aquadest}}$$

$$\rho_{campuran i} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{campuran i}}}$$

Contoh perhitungan:

$$\frac{1}{\rho_{campuran 1}} = \frac{40\%}{1,038} + \frac{1\%}{1,62} + \frac{59\%}{1}$$

$$= 1,0188$$

$$\rho_{campuran 1} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{campuran i}}} = \frac{1}{1,0188} = 1,0188 \text{ gr/cm}^3$$

Tabel A.2 Densitas Larutan setiap Variabel

No. Variabel	$\frac{1}{\rho_{campuran i}}$	$\rho_{campuran 1} (\frac{gr}{cm^3})$
1	0,9853	1,0148
2	0,9815	1,0188
3	0,9777	1,0228
4	0,9739	1,0268

- Perhitungan massa larutan:
Untuk setiap variabel, massa larutan dihitung dengan

persamaan berikut:

Massa larutan = volume kebutuhan running x ρ_{campuran}

Tabel A.3 Massa Larutan tiap Variabel

No. Variabel	Flowrate (L/menit)	Massa Larutan (kg)
1	1	5,07
	2	10,15
	3	15,22
2	1	5,09
	2	10,19
	3	15,28
3	1	5,11
	2	10,23
	3	15,34
4	1	5,13
	2	10,27
	3	15,40
Total		122,48

Massa total larutan yang dibutuhkan adalah 122,48 kg.

- Perhitungan kebutuhan tiap komponen larutan:
Untuk tiap komponen dalam pelarut di setiap variabel dihitung dengan persamaan berikut:

$$\text{Massa}_i = \text{massa larutan} \times \%w_i$$

Tabel A.4 Kebutuhan Pelarut tiap Variabel

No. Variabel	Flowrate (L/menit)	MDEA (kg)	MSG (kg)	Aquadest (kg)
1	1	2,03	0	3,04
	2	4,06	0	6,09
	3	6,09	0	9,13
2	1	2,04	0,05	3,01
	2	4,08	0,1	6,01
	3	6,11	0,15	9,02
3	1	2,05	0,1	2,97
	2	4,09	0,2	5,93
	3	6,14	0,31	8,9
4	1	2,05	0,15	2,93
	2	4,11	0,31	5,85
	3	6,16	0,46	8,78
Total		49,01	1,83	71,66

Total massa komponen yang diperlukan:

- MDEA = 49,01 kg
- MSG = 1,83 kg
- Aquadest = 71,66 kg

APPENDIKS B

B. Perhitungan % CO₂ Removal dan CO₂ Loading

Cara menghitung % CO₂ Removal dapat dihitung dengan persamaan 3.2, seperti berikut:

$$\frac{(CO_2 \text{ loading keluar} - CO_2 \text{ loading masuk}) \times \text{mol MDEA masuk/waktu}}{\text{mol CO}_2 \text{ masuk/waktu}} \times 100\%$$

Sedangkan untuk menghitung CO₂ loading dapat menggunakan persamaan 3.1, seperti berikut:

$$CO_2 \text{ loadings} = \frac{V_{CO_2 \text{ pada chittick}}}{22,4 \left(\frac{\text{mol}}{\text{volume}} CO_2 \right)} \text{ mol MDEA masuk}$$

Tabel B.1 Hasil Analisa Variabel MDEA Murni Setelah 5 Menit
Flowrate 1 L/menit

No.	Lean MDEA		Rich MDEA	
	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)
1	14,4	6,8	13,2	6,72
2	12,7	6,3	13,2	6,72
3	13	6,5	13,5	6,72
Rata-Rata	13,367	6,533	13,3	6,72

*Menggunakan HCl 0,8065 N

Contoh perhitungan: (digunakan variabel nomor 1)

% CO₂ removal =

$$\frac{(CO_2 \text{ loading keluar} - CO_2 \text{ loading masuk}) \times \text{mol MDEA masuk/waktu}}{\text{mol CO}_2 \text{ masuk/waktu}} \times 100\%$$

$$\% CO_2 \text{ removal} = \frac{(0,01757 - 0,01668) \times 3,497}{0,1838} \times 100\%$$

$$= 0,90667 \%$$

$$CO_2 \text{ loadings} = \frac{V_{CO_2 \text{ pada chittick}}}{22,4 \left(\frac{\text{mol}}{\text{volume}} CO_2 \right)} \text{ mol MDEA masuk}$$

$$= \frac{6,72 \text{ ml}}{\frac{0,0224 \text{ mol/ml}}{0,017485 \text{ mol}}} = 0,017157 \text{ ml}$$

Tabel B.2 Hasil Analisa Variabel MDEA Murni Setelah 5 Menit
Flowrate 2 L/menit

No.	Lean MDEA		Rich MDEA	
	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)
1	16,9	6	13,2	6,867
2	15,9	6,5	13,4	7,1
3	15,7	7	12,4	6,133
Rata-Rata	16,167	6,5	13,8	6,7

*Menggunakan HCl 0,8065 N

Tabel B.3 Hasil Analisa Variabel MDEA Murni Setelah 5 Menit
Flowrate 3 L/menit

No.	Lean MDEA		Rich MDEA	
	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)
1	16,9	6,5	13,2	6,867
2	15,9	6,4	13,3	7,1
3	15,7	6,42	12,5	6,133
Rata-Rata	16,167	6,44	13,32	6,67

*Menggunakan HCl 0,8065 N

Tabel B.4 Hasil Perhitungan Variabel MDEA 40% Setelah 5 Menit

L/G	% CO ₂ Removal	CO ₂ Loading
0,0333	0,90667	0,017157
0,0667	0,97143	0,017106
0,1	1,10095	0,017021

Tabel B.5 Hasil Analisa Variabel MDEA + 1% MSG Setelah 5 Menit Flowrate 1 L/menit

No.	Lean MDEA		Rich MDEA	
	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)
1	6,6	7,5	6,6	5,8
2	7	7	6,8	8,2
3	6,3	7,4	6,7	8,7
4	6,5	7,2	6,7	8,6
Rata-Rata	6,63	7,275	6,7	7,825

*Menggunakan HCl 0,7962 N

Tabel B.6 Hasil Analisa Variabel MDEA + 1% MSG Setelah 5 Menit Flowrate 2 L/menit

No.	Lean MDEA		Rich MDEA	
	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)
1	6,7	6,8	6,6	7,6
2	6,7	6,6	7	7,6
3	6,7	6,8	6,8	7,7
4	6,7	7	8	6,78
Rata-Rata	6,7	6,85	7,1	7,42

*Menggunakan HCl 0,7962 N

Tabel B.7 Hasil Analisa Variabel MDEA + 1% MSG Setelah 5 Menit Flowrate 3 L/menit

No.	Lean MDEA		Rich MDEA	
	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)
1	8	7	8,5	7,6
2	7,9	6	8,5	7,6
3	8,1	6,95	8,5	7,06
Rata-Rata	8	6,65	8,5	7,42

*Menggunakan HCl 0,7962 N

Tabel B.8 Hasil Perhitungan Variabel MDEA + 1% MSG Setelah 5 Menit

L/G	% CO ₂ Removal	CO ₂ Loading
0,0333	2,6714	0,019979
0,0667	2,7686	0,018944
0,1	3,2786	0,018702

Tabel B.9 Hasil Analisa Variabel MDEA + 2% MSG Setelah 5 Menit Flowrate 1 L/menit

No.	Lean MDEA		Rich MDEA	
	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)
1	6,275	7,8	6,1	8,4
2	6,6	7,7	6,2	8,4
3	6,7	7,075	6,2	8,4
Rata-Rata	6,525	7,525	6,167	8,4

*Menggunakan HCl 0,5 N

Tabel B.10 Hasil Analisa Variabel MDEA + 2% MSG Setelah 5 Menit Flowrate 2 L/menit

No.	Lean MDEA		Rich MDEA	
	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)
1	6,5	7,7	6,1	7
2	6,4	7,4	6,7	7,4
3	6,3	6,875	6,2	7,4
Rata-Rata	6,4	7,325	6,333	7,267

*Menggunakan HCl 0,5 N

Tabel B.11 Hasil Analisa Variabel MDEA + 2% MSG Setelah 5 Menit Flowrate 3 L/menit

No.	Lean MDEA		Rich MDEA	
	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)
1	6,275	7,4	6,6	7,9
2	6,6	7	6,7	8
3	6,7	7,2	6,65	8,8
Rata-Rata	6,525	7,2	6,65	8,233

*Menggunakan HCl 0,5 N

Tabel B.12 Hasil Perhitungan Variabel MDEA + 2% MSG Setelah 5 Menit

L/G	% CO ₂ Removal	CO ₂ Loading
0,0333	4,25	0,021447
0,0667	4,7357	0,021191
0,1	5,109	0,021021

Tabel B.13 Hasil Analisa Variabel MDEA + 3% MSG Setelah 5 Menit Flowrate 1 L/menit

No.	Lean MDEA		Rich MDEA	
	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)
1	6,8	7,4	6,4	8,4
2	6,6	7,4	6,2	8,6
3	6,9	7,4	6,2	8,6
Rata-Rata	6,767	7,4	6,267	8,533

*Menggunakan HCl 0,5 N

Tabel B.14 Hasil Analisa Variabel MDEA + 3% MSG Setelah 5 Menit Flowrate 2 L/menit

No.	Lean MDEA		Rich MDEA	
	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)
1	6,6	7	6,3	8,5
2	6,8	7,2	6,6	8,4
3	6,5	7,2	6,6	8,6
Rata-Rata	6,633	7,133	6,5	8,5

*Menggunakan HCl 0,5 N

Tabel B.15 Hasil Analisa Variabel MDEA + 3% MSG Setelah 5 Menit Flowrate 3 L/menit

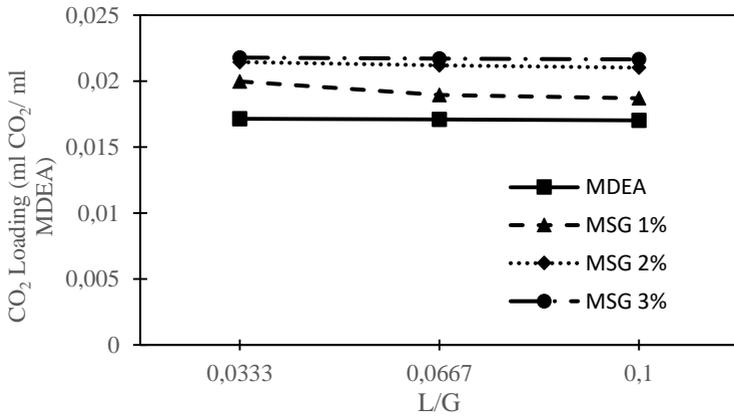
No.	Lean MDEA		Rich MDEA	
	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)	Volume HCl (ml)	Volume CO ₂ (ml)
1	6,6	7	6,3	8,5
2	6,7	7,1	6,6	8,36
3	6,5	7,2	6,6	8,6
Rata-Rata	6,6	7,1	6,5	8,48

*Menggunakan HCl 0,5 N

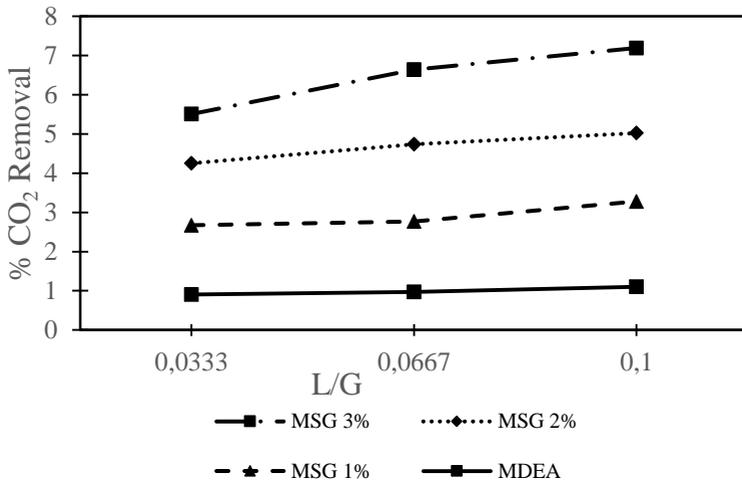
Tabel B.15 Hasil Perhitungan Variabel MDEA + 3% MSG Setelah 5 Menit

L/G	% CO ₂ Removal	CO ₂ Loading
0,0333	5,5048	0,021787
0,0667	6,6381	0,021702
0,1	7,1886	0,021651

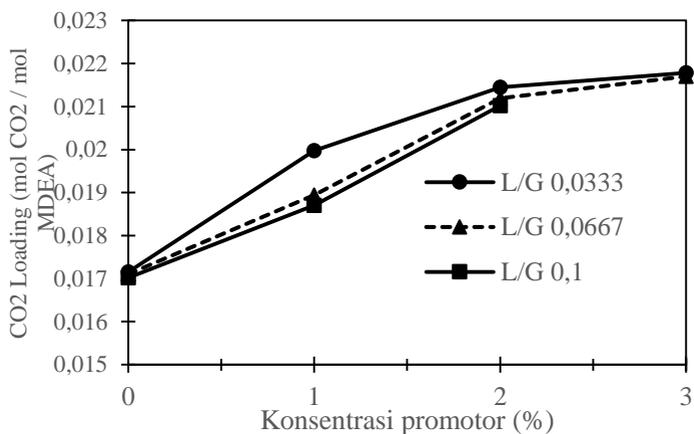
Dari hasil perhitungan, dapat dibuat grafik antara *flowrate* terhadap %CO₂ Removal dan CO₂ loading, serta grafik konsentrasi terhadap %CO₂ Removal dan CO₂ loading sebagai pembanding performa tiap variabel.



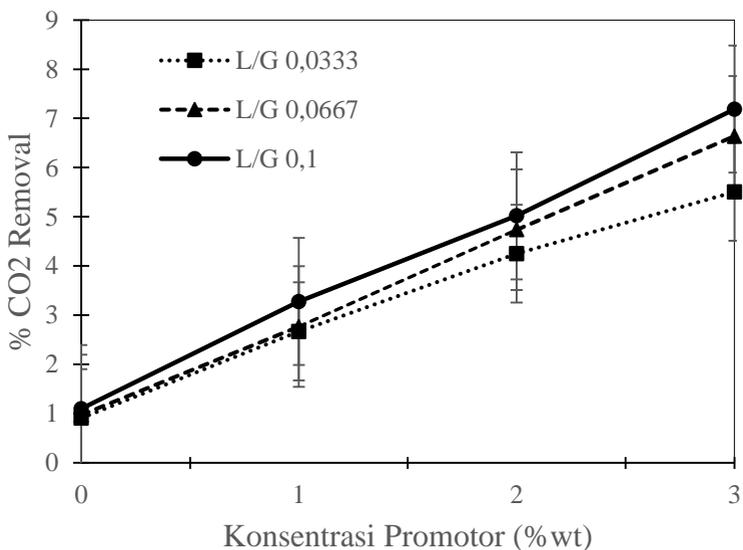
Gambar B.1 Grafik Perbandingan Rasio L/G terhadap CO₂ Loading



Gambar B.2 Grafik Perbandingan Rasio L/G terhadap % CO₂ Removal



Gambar B.3 Grafik Perbandingan Konsentrasi Promotor terhadap CO₂ Loading



Gambar B.4 Grafik Perbandingan Konsentrasi Promotor terhadap %CO₂ Removal

APPENDIKS C

C.1 Penentuan Kondisi Steady State

Penentuan kondisi steady state dilakukan selama 7 menit menggunakan MDEA 40% dan gas CO₂ 20% menggunakan *packed column absorber*. *Flowrate liquid* yang digunakan adalah 1 Liter/menit, sedangkan *flowrate gas* adalah 30 Liter/menit. Kemudian kandungan CO₂ yang terabsorb dianalisa menggunakan analisa *chittick*. Hasil analisa dapat dilihat pada **Tabel C.1**.

Tabel C.1 Hasil Analisa *Chittik* Kondisi *Steady State* *Flowrate* 1 Liter/menit

Waktu (menit)	Volume CO ₂
1	6,7
2	6,7
3	6,9
4	6,6
5	6,6
6	6,6
7	6,6

Selanjutnya, untuk meningkatkan akurasi penentuan waktu *steady state*, dilakukan percobaan dengan *flowrate liquid* 2 Liter/menit dan 3 Liter/menit.

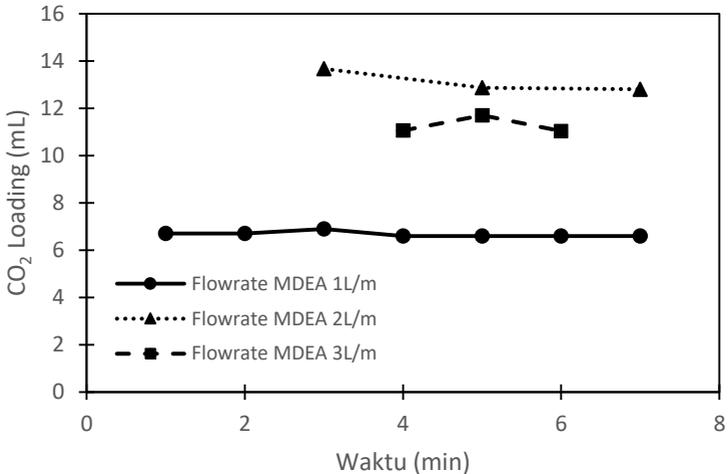
Tabel C.2 Hasil Analisa *Chittik* Kondisi *Steady State* *Flowrate* 2 Liter/menit

Waktu (menit)	Volume CO ₂
3	13,67
5	12,87
7	12,8

Tabel C.3 Hasil Analisa *Chittik* Kondisi *Steady State* Flowrate 3 Liter/menit

Waktu (menit)	Volume CO ₂
4	11,05
5	11,70
6	11,03

Dari **Tabel C.1** , **C.2** dan **C.3** dapat dibuat grafik waktu terhadap Volume CO₂ guna mempermudah dalam menentukan waktu kondisi *steady state*.



Gambar C.1 Grafik Penentuan Kondisi *Steady State*

Dari **Gambar C.1**, dapat ditentukan bahwa pada menit ke 5, kandungan CO₂ pada MDEA sudah mulai stabil hingga menit – menit selanjutnya. Maka dari itu, pengambilan sample pada percobaan ini adalah pada menit ke 5.

C.2 Penentuan Kondisi pH MDEA dalam Regenerisasi

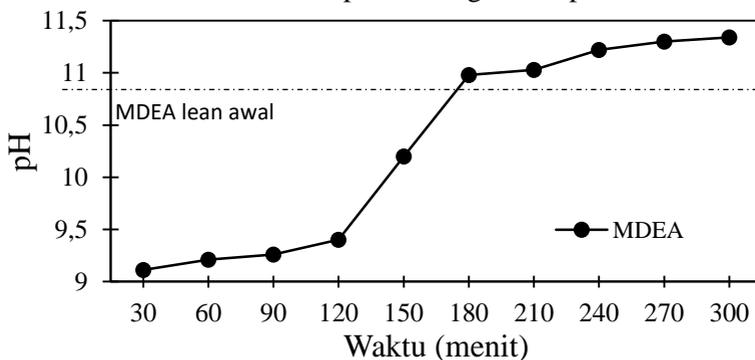
Guna mempermudah proses regenerasi MDEA, pH MDEA diukur selama 5 jam. Proses regenerasi MDEA dilakukan menggunakan *condenser reflux* dengan suhu 90°C.

Pada percobaan ini, diambil contoh MDEA 40% Lean memiliki pH sebesar 11,23. Maka untuk data analisa pH proses regenerisasi dapat dilihat **Tabel C.4**.

Tabel C.4 Analisa pH dalam Regenerisasi

Waktu (menit)	pH
30	9,11
60	9,21
90	9,26
120	9,4
150	10,2
180	10,98
210	11,03
240	11,22
270	11,3
300	11,34

Dari data tersebut, dapat dibuat grafik seperti berikut.



Gambar C.2 Grafik Perubahan pH MDEA dalam Proses Regenerisasi

Dari **Gambar C.2**, dapat disimpulkan bahwa pada saat 4 jam regenerisasi, pH MDEA Rich telah kembali seperti pH MDEA Lean, oleh karena itu proses regenerisasi dilakukan selama minum 4 jam.