

# Studi Kinetika Absorpsi Karbon Dioksida Menggunakan Larutan *Diethanolamine* (DEA) Berpromotor *Glycine*

Maria Hestia IC, Kartika Arsi, Susianto, Ali Altway

Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: susianto@chem-eng.its.ac.id

Dalam dunia industri, khususnya industri petrokimia dan minyak gas alam pada prosesnya diperlukan pemisahan gas CO<sub>2</sub> dimana gas ini merupakan gas yang korosif (*acid gas*). Sifat ini dapat merusak bagian dalam utilitas pabrik dan sistem perpipaan serta mengurangi nilai kalor dari gas alam. Dari kerugian seperti yang dijelaskan di atas, maka perlu dilakukan proses pemisahan CO<sub>2</sub> dari aliran gas, salah satu cara untuk menghilangkan CO<sub>2</sub> dari aliran gas adalah absorpsi reaktif menggunakan pelarut berbasis alkanolamine yang berkatalis. Oleh karena itu, dilakukan penelitian ini untuk menentukan data kinetika reaksi absorpsi CO<sub>2</sub> dalam larutan *diethanolamine* (DEA) dengan menggunakan promotor *glycine*. Pemilihan *glycine* sebagai promotor dikarenakan *glycine* merupakan senyawa amine primer yang bersifat reaktif, selain itu *glycine* mempunyai ketahanan terhadap suhu tinggi sehingga tidak mudah terdegradasi sesuai untuk diaplikasikan di dunia industri. Metode yang digunakan adalah absorpsi menggunakan peralatan *wetted wall column* skala laboratorium pada tekanan 1 atm. Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah bahwa kenaikan temperatur dari 303,15 - 328,15 K akan meningkatkan laju absorpsi gas karbon dioksida berpromotor *glycine* sebesar 24,2% dan kenaikan konsentrasi promotor *glycine* dari 1% - 3% berat dalam larutan *diethanolamine* menghasilkan kenaikan laju absorpsi gas karbon dioksida sebesar 59,764% serta didapatkan persamaan konstanta kinetika reaksi *glycine* yaitu  $1.419 \times 10^{12} \exp(-3634/T)$  (m<sup>3</sup>/kmol.s).

Kata kunci: absorpsi, CO<sub>2</sub>, promotor, wetted wall column.

## I. PENDAHULUAN

PADA masa sekarang emisi gas karbon dioksida atau CO<sub>2</sub> sangat diperhatikan oleh berbagai pihak, baik dari industri sampai masyarakat awam. Gas CO<sub>2</sub> dapat merusak bagian perpipaan dan utilitas pabrik karena sifat korosivitasnya. Selain itu, gas CO<sub>2</sub> juga dapat mengurangi nilai kalor dari gas alam. Pada LNG (*Liquified Natural Gas*), gas CO<sub>2</sub> harus dihilangkan, karena dapat membeku pada suhu rendah yang mengakibatkan penyumbatan pada system perpipaan dan tubing pada *heat exchanger*. Pada industri amoniak, CO<sub>2</sub> merupakan racun pada katalis sintesa amoniak, oleh karena itu CO<sub>2</sub> harus dipisahkan sebelum memasuki unit sintesa amoniak<sup>[1]</sup>.

Selain itu, penumpukan gas karbon dioksida di atmosfer dapat menimbulkan efek rumah kaca yang mengakibatkan pemanasan global. Penumpukan gas karbon dioksida di atmosfer ini sebagian besar disebabkan oleh emisi gas CO<sub>2</sub> dari berbagai industri akibat proses pembakaran dan proses-

proses kimia lainnya. Menurut UNEP (2005), konsentrasi keseluruhan gas karbon dioksida di atmosfer selalu bertambah. Melihat besarnya kerugian yang dapat ditimbulkan oleh gas karbon dioksida, maka penting dilakukan proses pemisahan gas karbon dioksida dari aliran gas. Rao dan Rubin (2002), mengemukakan ada beberapa teknologi untuk memisahkan dan menangkap karbon dioksida seperti : proses absorpsi secara fisik dan kimia, proses adsorpsi, proses *cryogenic* (pendinginan), teknologi membran dan menggunakan sistem alga atau mikroba. Teknologi pemisahan karbon dioksida yang ekonomis, telah dikembangkan dengan baik dan telah diaplikasikan pada berbagai proses komersial adalah proses absorpsi secara kimia<sup>[26]</sup>.

Proses absorpsi kimia merupakan proses pemisahan gas menggunakan pelarut dengan reaktan yang dapat bereaksi dengan komponen gas yang terlarut dan sering dijumpai dalam dunia industri. Tujuan dari proses absorpsi dalam industri adalah untuk memisahkan komponen dari campuran gas atau untuk menghasilkan suatu produk reaksi, dan salah satu komponen dari campuran gas yang sering dipisahkan adalah gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Penggunaan pelarut kimia dimaksudkan untuk meningkatkan pelarut dalam menyerap gas karbon dioksida. Beberapa jenis pelarut yang sering digunakan adalah pelarut organik seperti sulfinol; kalium karbonat (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>); dan senyawa alkanolamine<sup>[3]</sup>

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

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

menaikkan laju reaksi DEA tanpa menghilangkan keuntungan dari penggunaan larutan DEA itu sendiri<sup>[5]</sup>.

Adapun beberapa penelitian-penelitian terdahulu yang mengkaji kinetika reaksi absorpsi kedalam larutan amine. Lin<sup>[22]</sup> mempelajari tentang karakteristik performa dan modeling dari absorpsi CO<sub>2</sub> oleh amine dalam packed kolom. Penelitian lain juga telah dilakukan oleh Brouwer (2005) mengenai *Amino-acid Salt* untuk menangkap CO<sub>2</sub> dari flue gas dimana larutan *amino acid salt* dapat secara baik digunakan untuk menangkap CO<sub>2</sub> karena memiliki resitensi yang baik terhadap oksigen dan kinetika reaksi yang cepat<sup>[11]</sup>.

Rowland (2011) menggunakan *glycine* sebagai salah satu aktivator absorpsi CO<sub>2</sub>, menjelaskan bahwa tingkat penyerapan CO<sub>2</sub> dengan *glycine* meningkat dan memiliki reaksi dengan CO<sub>2</sub> yang lebih cepat daripada amonia. Dikarenakan *glycine*, suatu asam amino, mampu membentuk karbamat dan juga menerima proton. Dan *glycine* juga merupakan golongan senyawa amine primer yang mempunyai kemampuan absorpsi CO<sub>2</sub> lebih baik dibanding dengan TEA yang merupakan golongan senyawa amine tersier (Ullmann, 2005). Serta *glycine* memiliki daya tahan pada suhu tinggi yang baik sehingga tidak mudah terdegradasi oleh panas.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan, belum terdapat studi mengenai kinetika reaksi menggunakan *diethanolamine* (DEA) dengan *glycine*, oleh karena itu perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk mengetahui nilai konstanta laju reaksi dari DEA berpromotor *glycine* ini.

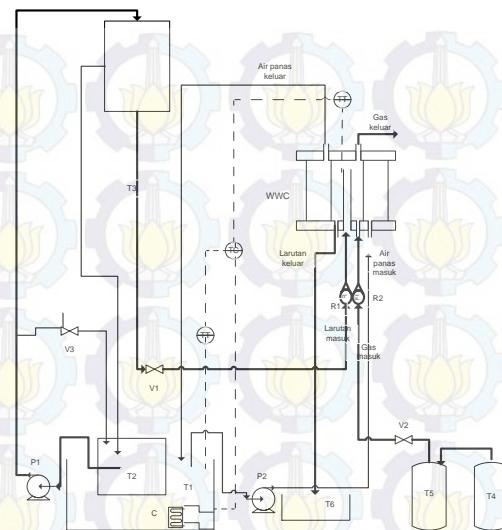
## II. URAIAN PENELITIAN

### A. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah *Diethanolamine* (DEA), *Glycine*, Asam oksalat (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), Natrium hidroksida (NaOH), Asam klorida (HCl), Aquadest, Indikator phenolphthalein dan Indikator metil orange.

### B. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini ialah *wetted wall column*. *Wetted Wall Column* tersusun atas dua silinder koaksial dari bahan kaca. Di bagian tengah terdapat *tube* dari bahan *stainless steel*. *Tube* berfungsi sebagai saluran aliran larutan *diethanolamine* (DEA)-*glycine*. Larutan *diethanolamine* mengalir di bagian dalam *tube* kemudian *overflow* pada bagian ujung atas *tube* dan bergerak mengalir ke bawah membentuk lapisan tipis di seluruh permukaan *tube*, sedangkan aliran gas karbon dioksida mengalir dari bawah ke atas dan terjadi kontak dengan lapisan tipis larutan *diethanolamine* di seluruh permukaan luar *tube* tersebut. Sisi anulus antara kedua silinder kaca tersebut berfungsi untuk aliran pemanas dari *Water Bath Thermostat* sebagai media pengatur kestabilan temperatur sistem WWC.



**Gambar 1.** Skema Peralatan *Wetted Wall Column*

Dari **Gambar 1**, Langkah pertama adalah mengisi air ke dalam *waterbath* (T1) sebagai pengatur temperatur dalam jaket WWC lalu membuat larutan *diethanolamine* 30% berat. Menambahkan masing-masing *glycine* (% berat) sesuai dengan variabel ke dalam larutan DEA 30% berat, dan untuk DEA murni tidak ditambahkan promotor *glycine* lalu memasukkan larutan DEA berpromotor ke dalam tangki *reservoir* (T2). Mengeset suhu operasi sesuai dengan variabel. Lalu mensirkulasikan air panas pada sisi anulus kolom WWC dan kembali ke *waterbath* (T1) selanjutnya mensirkulasikan larutan DEA berpromotor menggunakan pompa dari tangki *reservoir* (T2) ke tangki *overflow* (T3) hingga larutan *overflow*. Mengatur laju alir larutan DEA berpromotor, sehingga larutan mengalir dari bawah ke atas melalui bagian dalam *tube* hingga terbentuk lapisan tipis pada permukaan *tube* dan pada saat suhu sistem telah mencapai yang diinginkan dan aliran telah stabil, campuran gas karbon dioksida dan nitrogen dialirkkan melewati tangki saturator (T5). Kemudian campuran gas karbon dioksida dan nitrogen mengalir dari bawah kolom menuju atas kolom bagian luar pipa *stainless steel* sehingga terjadi kontak antara gas karbon dioksida dan nitrogen dengan lapisan tipis cairan di seluruh permukaan luar *tube* hingga kondisi *steady state*. Apabila tercapai kondisi *steady state*, mengambil sampel larutan DEA berpromotor pada tangki penampung sampel (T6) untuk dilakukan analisa kandungan karbonat dan bikarbonat menggunakan metode titrasi menggunakan indikator *phenolphthalein* dan *metil orange*.

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



Di dalam larutan terjadi reaksi-reaksi kesetimbangan sebagai berikut :





Dimana :

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

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

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

Perhitungan  $[\text{OH}^-]$  dan  $[\text{CO}_2]_e$  dari reaksi kesetimbangan menggunakan persamaan (Yi dkk, 2009):

$$[\text{OH}^-] = \frac{K_w}{K_2} \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} \quad (10)$$

$$[\text{CO}_2]_e = \frac{K_c K_2}{K_{eq} K_1} \frac{[\text{HCO}_3^-]^2}{[\text{CO}_3^{2-}]} \quad (11)$$

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

$$K_w = \exp \left( 39,555 - \frac{9,879 \times 10^4}{T} + \frac{5,6883 \times 10^7}{T^2} - \frac{1,465 \times 10^{10}}{T^3} + \frac{1,3615 \times 10^{12}}{T^4} \right) \quad (12)^{[33]}$$

$$\log K_1 = - \frac{3404,7}{T} + 14,843 - 0,03279T \quad (13)$$

$$K_2 = \exp \left( -294,74 + \frac{3,6439 \times 10^5}{T} - \frac{1,8416 \times 10^8}{T^2} + \frac{4,1579 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{3,5429 \times 10^{12}}{T^4} \right) \quad (14)$$

$$K_{DEA} = 10^{\left( \frac{-2274,5}{T} + 10,4493 \right)} \times [\text{DEA}] \quad (15)$$

(Blauwhoff, 1983)

$$K_b = \exp(-3071,15/T + 6,77 \ln T + (-48,76)) \quad (16)$$

$$K_{eq} = \exp \left( - \frac{17067,2}{T} + (-66,8 \ln T) + 439,71 \right) \quad (17)$$

Untuk menentukan nilai  $k_{app}$  dari glycine dapat digunakan persamaan dibawah ini :

$$k_{app} = k_{ov} - k_{OH^-} [\text{OH}^-] - k_{DEA} [\text{DEA}] \quad (20)$$

dimana :

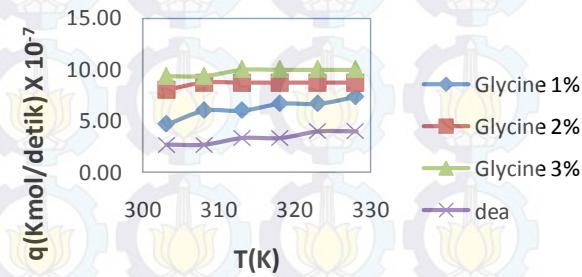
$$k_{app \text{ glycine}} = k_{glycine} [\text{glycine}] \quad (21)$$

Kemudian konstanta laju reaksi glycine ( $k_{glycine}$ ) dijadikan fungsi temperatur yang dinyatakan dengan persamaan Arrhenius :

$$k_{glycine} = A_{glycine} e^{-\frac{E}{RT}} \quad (23)$$

### III. HASIL DAN DISKUSI

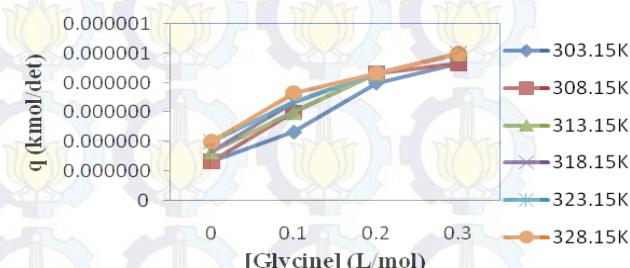
#### A. Pengaruh Kenaikan Suhu Terhadap Laju Absorpsi Karbon Dioksida



**Gambar 4.1** Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine* (DEA) murni dan *diethanolamine* (DEA) berpromotor glycine pada suhu 303,15 K – 328,15 K

Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absorpsi karbon dioksida ditunjukkan pada **Gambar 4.1**, dimana laju absorpsi karbon dioksida cenderung meningkat seiring dengan peningkatan suhu pada konsentrasi glycine 1% berat. Peningkatan laju absorpsi ini disebabkan karena semakin meningkatnya suhu, maka energi kinetik molekul-molekul zat yang bereaksi akan bertambah sehingga reaksi yang terjadi akan semakin cepat serta dengan kenaikan suhu difusifitas menjadi meningkat<sup>[23]</sup>. Sedangkan pada konsentrasi glycine 2% berat dan 3% berat cenderung stabil pada suhu 313,15 K ke atas. Hal ini dikarenakan reaksi absorpsi berlangsung terlalu cepat sehingga pengaruh kinetika reaksi tidak terlalu signifikan dan yang terjadi hanya perpindahan massanya secara difusi. Sehingga didapat rata-rata peningkatan laju absorpsi dari suhu pada DEA berpromotor glycine 1-3% dari suhu 303,15 K menjadi 328,15 K sekitar 24,2%.

#### B. Pengaruh Konsentrasi Promotor Terhadap Laju Absorpsi Karbon Dioksida



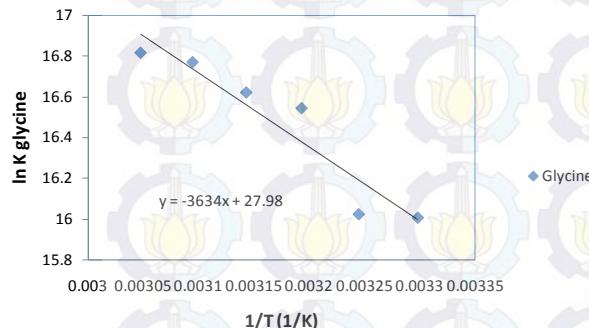
**Gambar 4.2** Pengaruh konsentrasi promotor terhadap laju absorpsi karbon dioksida dalam larutan *diethanolamine* (DEA) murni dan *diethanolamine* (DEA) berpromotor glycine pada suhu 303,15 K – 328,15 K

Pada **Gambar 4.2** menunjukkan pengaruh konsentrasi promotor terhadap laju absorpsi karbon dioksida, dimana semakin besar konsentrasi promotor yang diberikan, maka semakin meningkat pula laju absorpsi karbon dioksida. Gambar 4.2 menunjukkan pula kenaikan laju absorpsi dari penambahan konsentrasi glycine 0,1379 mol/L (1% berat) menjadi 0,4139 mol/L (3% berat) pada suhu 303,15 K sekitar 59,764%. Sedangkan, dari **Gambar 4.1** dapat pula kita lihat

bahwa terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara pelarut DEA murni dengan pelarut yang menggunakan promotor glycine, laju absorpsi antara DEA murni dengan DEA berpromotor 1% memiliki kenaikan sebesar 46.4%. Secara keseluruhan laju absorpsi untuk DEA murni dengan DEA berpromotor glicine 1-3% memiliki kenaikan sebesar 59.27%.

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

### C. Kereaktifan Promotor *Glycine* Pada Absorpsi Karbon Dioksida



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

Kereaktifan *glycine* sebagai promotor dalam absorpsi karbon dioksida dapat ditentukan dari konstanta kecepatan reaksi yang dihitung dengan persamaan *Arrhenius*. Pada **Gambar 4.3**, didapatkan intersept untuk *glycine* yaitu anti- $\ln A = 1.419 \times 10^{12}$  dan slope  $(-E/R) = -3634$ , sehingga diperoleh persamaan  $k_{\text{glycine}} = 1.419 \times 10^{12} \exp(-3634/T)$ . Dari hasil percobaan ini, nilai  $k_{\text{ov}}$  antara pelarut DEA murni dengan DEA berpromotor glycine lebih besar nilai  $k_{\text{ov}}$  berpromotor glycine, dapat dilihat pada **Tabel.1**. Hal ini dikarenakan *glycine* termasuk golongan senyawa amine primer yang menurut literatur mempunyai kemampuan lebih baik dalam absorpsi karbon dioksida dibandingkan dengan DEA yang merupakan senyawa amine sekunder (Ullmann, 2005). Serta *glycine* mempunyai ketahanan terhadap panas yang baik, sehingga tidak mudah terdegradasi [13].

**Tabel 1.** Nilai  $K_{\text{ov}}$

T(K)	K <sub>ov</sub>			
	DEA murni	Gly 1%	Gly 2%	Gly 3%
303.15	71156.78	288638.90	1513339.46	2748444.97
308.15	80312.59	670926.19	2346850.45	3172056.20
313.15	154982.14	761978.11	2693756.57	4973926.16
318.15	174674.97	1205391.7	3090104.43	5754413.15
323.15	312406.9655	1367965.33	3537654.209	6645143.272
328.15	351489.7783	2146815.606	4046725.159	7668669.041

### IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

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

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

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Petrokimia Gresik dan Saka Indonesia Pangkah Limited atas bantuannya untuk menyediakan sampel bahan, serta rekan-rekan seperjuangan dari laboratorium Perpindahan Panas Massa dan Pemisahan Teknik Kimia FTI-ITS.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ahmadi. M, Gomes. V.G, Advanced Modelling in Performance Optimization for Reactive Separation in Industrial CO<sub>2</sub> Removal, Separation and Purification Technology 63 (2008) 107-115.
- [2] Altway. A, Perpindahan Massa disertai reaksi kimia, Bee Marketer Institute, Jakarta, 2008.
- [3] Aronu. E.U, Svenden. F.S, Investigation of Amine Amino Acid Salt for Carbon Dioxide Absorption, International Journal of Greenhouse Gas Control 4 (2010) 771-775.
- [4] Astarita. G, Carbon Dioxide Absorption in Aqueous Monoethanolamine Solutions, Chemical Engineering Science 16 (1960) 202-207.
- [5] Astarita. G, Savage. D.W, Promotion of CO<sub>2</sub> Mass Transfer in Carbonate Solutions, Chemical Engineering Science 36 (1980) 581-588.
- [6] Augugliaro. V, dan Rizzuti. L, Kinetics of carbon dioxide absorption into catalysed potassium carbonate solutions, Chem.Eng. Sci. 42 (1987) 2339-2343.
- [7] Bosch. H, Versteeg. G.F, Gas-Liquid Mass Transfer with Parallel Reversible Reactions I. Absorption of CO<sub>2</sub> into Solution of Sterically Hindered Amines, Chemical Engineering Science 44 (11) (1989) 2723-2734.
- [8] Bishnoi. P.S, dan Rochelle. G.T, "Absorption of carbon dioxide into aqueous piperazine: Reaction kinetics, mass transfer and solubility", Chem. Eng. Sci. 55 (22) (2000) 5531-5543.
- [9] Bishnoi. P.S, Carbon dioxide absorption and solution equilibrium in piperazine activated methylmethanolamine, Ph.D Dissertation, The University of Texas at Austin (2000).
- [10] Blauwhoff. P.M.M, Versteeg. G.F, A Study on The Reaction between CO<sub>2</sub> And Alkanolamines in Aqueous Solutions, Chemical Engineering Science 38 (9) (1983) 1411-1429.
- [11] Brouwer. J.P, Feron. P.H.M, Asbroek ten, N.A.M, "Amino-acid salt for CO<sub>2</sub> Capture from Flue Gas", TNO Science & Industry, Department of Separation Technology (2005).

- [12] Cullinane. J.T, dan Rochelle. G.T, Carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by piperazine, *Chem.Eng. Sci.* 59 (2004) 3619-3630.
- [13] Cullinane. J.T, Thermodynamics and kinetics of aqueous piperazine with potassium carbonate for carbon dioxide absorption, Dissertation, University of Texas, Austin (2005).
- [14] Dang. Hongyi, Rochelle. G.T, CO<sub>2</sub> Absorption Rate and Solubility in Monoethanolamine/Piperazine/Water, The University of Texas at Austin (2001).
- [15] Danckwerts. P.V, Gas-Liquid Reactions, McGraw-Hill, New York, 1970.
- [16] Gorak, Andrzej, European Roadmap of Process Intensification: Reactive Absorption, Creative Energie (2005).
- [17] Gosh. U.K, Kentish. S.E, Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Potassium Carbonate Promoted by Boric Acid, *Energy Procedia* 1 (2009) 1075-1081
- [18] Herzog, Howard., Golomb, Dan, Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel Use, Massachusetts Institute of Technologi, Laboratory for Energy and the Environment (2004).
- [19] Khodayari, Arezoo, Experimental and Theoretical Study of Carbon Dioxide Absorption into Potassium Carbonate Solution Promoted with Enzyme, University of Illinois (2010).
- [20] Knuutila, Hanna, Juliussen, Olav, Density and N<sub>2</sub>O Solubility of Sodium and Potassium Carbonate Solutions in The Temperature Range 25 to 80°C, *Chemical Engineering Science* (2010) 2177-2182
- [21] Kumar. S.Dash, Samanta. A, Absorption of Cabon Dioxide in Piperazine Activated Concentrated Aqueous 2-amino-2-methyl-1-propanol Solvent, *Chemical Engineering Science* 66 (2011) 3223-3233
- [22] Lin. S.H, dan Shyu. C.T, Performance characteristics and modeling of carbon dioxide absorption by amines in a packed column, *Waste Management* 19 (1999) 255-262.
- [23] Pacheco. M.A, Kaganoi. S, Rochelle. G.T, CO<sub>2</sub> Absorption into Aqueous Mixtures of Diglycolamine and Methyldiethanolamine, *Chemical Engineering Science* 55 (2000) 5125-5140
- [24] Polasek. J, dan Bullin. J.A, Selecting amines for sweetening units, Tulsa, OK: Gas Processors Association (1994).
- [25] Rahimpour. M.R, Kashkooli. A.Z, Enhanced Carbon Dioxide Removal by Promoted Hot Potassium Carbonate in a Split-Flow Absorber, *Chemical Engineering and Processing* 43 (2004) 857-865.
- [26] Rao. A.B, Rubin. E.S, A Technical, Economic and Environmental Assessment of Amine-based CO<sub>2</sub> Capture Technology for Power Plant Greenhouse Gas Control, National Energy Technology Laboratory, West Virginia, (2002).
- [27] Rochelle. G.T, Dugas. R.E, Carbon Dioxide Absorption, Desorption, and Diffusion in Aqueous Piperazine and Monoethanolamine, The University of Texas at Austin, (2009).
- [28] Process, *Journal of Environmental Sciences* 24(3) (2012) 494-498
- [29] Shen. S. Feng. X, Zhao. R, Kinetic Study of Carbon Dioxide Absorption with Aqueous Potassium Carbonate Promoted by Arginine, *Chemical Engineering Journal* 222 (2013) 478-487
- [30] Thee. H, Smith. K.H, Silva. da Gabriel, Kentish. S.E, Carbon Dioxide Absorption into Unpromoted and Borate-Catalyzed Potassium Carbonate Solutions ,*Chemical Engineering Journal* 181-182 (2012) 604-701
- [31] Wibawa. Gede, Gunawan. Setiyo, Cryogenic Freeze-Out Area Heat Exchanger Sebagai Salah Satu Alternatif Pencairan dan Penghilangan CO<sub>2</sub> pada Liquified Natural Gas Skala Kecil dan Sedang, Pusat Studi Energi dan Rekayasa Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (2011).
- [32] Wang. M, Lawal. A, Stephenson. P, Post-combustion CO<sub>2</sub> Capture with Chemical Absorption: A State-of-the-Art Review, *Chemical Engineering Research and Design* 89, (2011) 1609-1624.
- [33] Yi. Fei, Zou. Hai-Kui, Chu. Guang-Wen, Shao. Lei, Modeling and Experimental Studies on Absorption of CO<sub>2</sub> by Benfield Solution in Rotating Packed Bed, *Chemical Engineering Journal* 145 (2009) 377-384