

## SIMULASI ABSORPSI REAKTIF CO<sub>2</sub> DALAM SKALA INDUSTRI DENGAN PELARUT K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> BERKATALIS

**Nur Ihda Farihatin Nisa, Firsta Hardiyanto, Hendi Riesta Mulya, Ali Altway, Susianto**

Laboratorium Perpindahan Massa dan Panas Program Studi Teknik kimia, FTI- ITS  
Jl. Raya Sukolilo, Surabaya 60111  
E-mail : [nurihda\\_fn@yahoo.com](mailto:nurihda_fn@yahoo.com)

### **Abstrak**

CO<sub>2</sub> merupakan gas yang bersifat asam, dengan adanya uap air akan menyebabkan CO<sub>2</sub> semakin korosif. Gas CO<sub>2</sub> juga dapat mengurangi nilai kalor pada kilang LNG dan gas alam. Oleh karena itu, pemisahan CO<sub>2</sub> dari campuran gas merupakan proses yang penting. Absorpsi reaktif menggunakan pelarut kimia adalah metode yang paling banyak digunakan karena efektif dan ekonomis. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model matematik unit absorpsi CO<sub>2</sub> skala industri dengan pelarut K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> berkatalis serta mengestimasi kinerja unit CO<sub>2</sub> removal yang dinyatakan dengan %recovery CO<sub>2</sub> dalam absorber dan komposisi gas yang keluar dari absorber. Simulasi dilakukan secara teoritis dengan mengembangkan model matematis untuk fenomena perpindahan massa yang disertai reaksi kimia pada proses recovery CO<sub>2</sub> dalam larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> berkatalis, dengan asumsi steady state dan isothermal. Model perpindahan massa yang digunakan adalah model Film. Data kinetika reaksi dalam pemodelan ini diperoleh dari Fei Yi (2009). Sedangkan data kelarutan gas diperoleh dari Weisenberger (1996). Penelitian ini menggunakan pemrograman MATLAB 7.8. Selanjutnya hasil penelitian ini divalidasi dengan data operasi di pabrik PKT II. Dari hasil simulasi diperoleh data konstanta kecepatan reaksi untuk absorpsi CO<sub>2</sub> ke dalam larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> berkatalis ACT-1 yaitu  $k_C = 26787699274e^{\left(\frac{-2868,6462}{T}\right)} \text{cm}^3/\text{mol.s}$ .

**Kata kunci :** Absorpsi, CO<sub>2</sub> removal, Isothermal, % Recovery CO<sub>2</sub>

## SIMULATION OF REACTIVE CO<sub>2</sub> ABSORPTION IN SCALE INDUSTRY WITH SOLVENT CATALITIC K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

### **Abstract**

CO<sub>2</sub> is an acidic gas, in the presence of water vapor will cause more CO<sub>2</sub> corrosive. CO<sub>2</sub> can also reduce the calorific value of LNG and natural gas. Therefore, the separation of CO<sub>2</sub> from gas mixtures is an important process. Reactive absorption using chemical solvents are the most widely used method because it is effective and economical. This study aims to develop a mathematical model of industrial scale CO<sub>2</sub> absorption unit with solvent catalytic K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> estimate the performance of the CO<sub>2</sub> removal unit represented by the % recovery of CO<sub>2</sub> in the absorber and the composition of the gas coming out of the absorber. Simulations carried out theoretically by developing a mathematical model for mass transfer phenomena coupled chemical reactions on CO<sub>2</sub> recovery process berkatalis K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> solution, assuming steady state and isothermal. The model used is the mass transfer model of film. The data in modeling the kinetics of the reaction is obtained from Yi Fei (2009). While the data obtained from gas solubility Weisenberger (1996). This study uses MATLAB 7.8 programming. Furthermore, the results of this study validated the plant operation data in CCP II. Data obtained from the simulation results for the reaction rate constants of CO<sub>2</sub> absorption into K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> solution catalis ACT -1 is  $k_C = 26787699274e^{\left(\frac{-2868,6462}{T}\right)} \text{cm}^3/\text{mol.s}$ .

**Keywords:** Absorption, CO<sub>2</sub> removal, Isothermal, % CO<sub>2</sub> Recovery

## PENDAHULUAN

Berbagai industri petrokimia, industri minyak, dan gas alam yang pada prosesnya memerlukan pemisahan gas CO<sub>2</sub> karena termasuk kategori gas yang bersifat asam (*acid gas*) dan korosif sehingga dapat merusak bagian dalam utilitas pabrik dan sistim perpipaannya. Gas CO<sub>2</sub> dapat mengurangi nilai kalor dari gas alam. Pada kilang *Liquefied Natural Gas* (LNG), gas CO<sub>2</sub> harus dihilangkan karena pada suhu sangat rendah CO<sub>2</sub> akan membeku yang mengakibatkan tersumbatnya sistim perpipaan dan merusak *tubing-tubing* pada *main heat exchanger*. Gas CO<sub>2</sub> juga merupakan produk samping pada industri amoniak. Gas CO<sub>2</sub> merupakan racun terhadap katalis sintesa amoniak, maka CO<sub>2</sub> harus dipisahkan dari gas proses sebelum memasuki unit sintesa amoniak.

Melihat besarnya kerugian yang dapat ditimbulkan oleh CO<sub>2</sub>, maka penting sekali dilakukan proses pemisahan CO<sub>2</sub> dari aliran gas. Rao dan Rubin (2002), menyampaikan ada beberapa teknologi untuk memisahkan dan menangkap CO<sub>2</sub> antara lain proses *Cryogenic* (pendinginan), proses adsorpsi, proses pelarutan, difusi dengan teknologi membran, dan absorpsi secara kimiawi. Absorpsi CO<sub>2</sub> secara kimia dengan pelarut (absorpsi reaktif) adalah metode pemisahan yang dikembangkan dengan baik dan telah diaplikasikan pada berbagai proses komersial, termasuk pemurnian gas dan produksi amoniak (Cullinane, 2005).

Faktor biaya terbesar untuk menangkap CO<sub>2</sub> adalah konsumsi energi untuk regenerasi pelarut, dapat mencapai 49% dari total biaya penangkapan CO<sub>2</sub> (Rochelle dan Dang, 2001). Faktor lain adalah kapasitas pelarut yang menentukan jumlah CO<sub>2</sub> yang diserap per unit dari pelarut. Banyak pelarut yang digunakan pada pengolahan gas, tetapi secara umum yang paling efektif adalah pelarut senyawa 2-*alkanolamine* dan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> panas (Cullinane, 2005). Senyawa *alkanolamine* memiliki keunggulan dalam mengabsorpsi CO<sub>2</sub> karena laju absorpsinya cepat, biaya murah, tetapi panas absorpsinya tinggi (20-25 kcal/mol). Kelemahan senyawa *alkanolamine* terutama kelompok *primary* dan *secondary* adalah terbentuknya senyawa *carbamate* yang stabil, tidak dapatnya memisahkan senyawa-senyawa *mercaptan*, hilangnya uap yang besar menyebabkan tekanan uap yang tinggi, terdegradasi pada *overheating* (>100°C) dan terjadi reaksi lebih lanjut dimana menghasilkan produk samping yang tidak bisa diregenerasi (Bartoo dan Ruzicka, 1991).

Larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> telah digunakan secara luas terutama untuk pemisahan CO<sub>2</sub> dari gas sintesa dan gas alam. Penggunaan larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> tersebut karena memiliki stabilitas tinggi, biaya rendah, dan kebutuhan energi untuk regenerasi pelarut rendah, tetapi laju reaksi lambat dibandingkan dengan senyawa-senyawa *alkanolamine* (Benson dkk.,

1956; Astarita dkk., 1981). Penambahan promotor pada larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dapat meningkatkan proses absorpsi CO<sub>2</sub>. Larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dengan promotor senyawa *alkanolamine* menunjukkan cara yang efektif untuk meningkatkan keseluruhan *performance* bahan pelarut, khususnya senyawa *alkanolamine* kelompok *primary* dan *secondary* (Savage dan Sartori, 1984; Tseng dkk. 1988; Bosch, dkk., 1989; Augugliarodan Rizzuti, 1987; Cullinane dan Rochelle, 2004; Rahimpour dan Kashkool, 2004b; Ahmadi dkk. 2008).

Dalam prakteknya, proses absorpsi CO<sub>2</sub> terjadi pada tekanan tinggi, beberapa komponen disamping CO<sub>2</sub> dapat teresap dan terjadi interaksi antar komponen dalam *film gas* maupun *film liquid* yang mempengaruhi proses perpindahan massa maupun reaksi kimia. Absorpsi reaktif melibatkan berbagai komponen campuran gas dan campuran liquid yang mewakili campuran multi komponen gas dan atau cairan yang properti perpindahannya jauh lebih kompleks dibandingkan dengan perpindahan massa binari sederhana, sementara sebagian besar model adalah uni komponen yang mengasumsikan hanya satu komponen yang berpindah melalui *interface* atau difusi molekular tunggal.

Penelitian-penelitian terdahulu tentang pemisahan gas CO<sub>2</sub> dengan menggunakan absorben K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dalam *packed column* telah banyak dilakukan. Alatiqi, dkk (1994) melakukan *removal* CO<sub>2</sub> dimana absorbernya berupa *packed column* dan strippernya berupa *tray column*. Mofarahi, dkk (2008) melakukan simulasi Pemulihan CO<sub>2</sub> menggunakan kolom absorpsi dan *stripping* bersama dengan unit pemurnian CO<sub>2</sub>. Fe Yi, dkk (2009) mempelajari proses absorpsi CO<sub>2</sub> dengan larutan *Benfield* dan katalis DEA. Sanitarsi, dkk (2009) melakukan simulasi Pemulihan CO<sub>2</sub> pada gas sintesa dengan absorben K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> pada katalis DEA dalam *packed column*. Plaza, dkk (2011) memodelkan CO<sub>2</sub> *removal* menggunakan larutan *piperazine*.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan model matematik unit absorpsi CO<sub>2</sub> skala industri dengan pelarut K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> berkatalis serta mengestimasi kinerja unit CO<sub>2</sub> removal yang dinyatakan dengan %Pemulihan CO<sub>2</sub> dalam *absorber* dan komposisi gas yang keluar dari *absorber*. Manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat dijadikan acuan pada industri untuk merancang unit CO<sub>2</sub> removal dan menganalisa serta mengoptimasi kinerja unit tersebut.

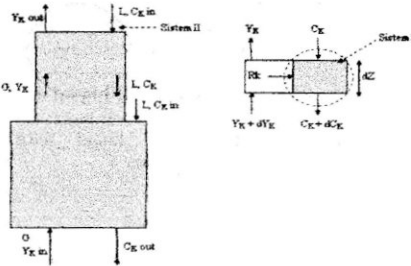
## METODE PENELITIAN

Secara garis besar, pelaksanaan penelitian akan dilakukan dengan pendekatan secara teoritis (simulasi) dengan mengembangkan model matematis untuk fenomena perpindahan massa yang disertai reaksi kimia pada proses Pemulihan CO<sub>2</sub>

dalam larutan  $K_2CO_3$  berkatalis, dengan asumsi *steady state* dan *isothermal*.

### Pengembangan Model Matematis Proses Absorpsi dalam Packed Column

Pengembangan model matematis dilakukan dengan membuat neraca massa differensial pada *packed column*.



Gambar 1. Mekanisme Proses Absorpsi

Neraca Massa Diferensial :

#### Sistem I

$$CO_2: \bar{R}aA dz = r(C_A^0, C_B^0) \phi_L dV \quad (1)$$

$$K_2CO_3: -LdC_B^0 - v_B r(C_A^0, C_B^0) \phi_L dV = 0$$

Substitusi persamaan (1) ke persamaan (2) :

$$-LdC_B^0 - v_B \bar{R}aA dz = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dC_B^0}{dz} = \frac{-v_B \bar{R}aA}{L}$$

(4)

Persamaan (4) diselesaikan dengan metode kolokasi orthogonal :

$$C_{Bj} = C_{Bin} - \frac{v_B Z_T}{H_T} \sum_{i=0}^{NC-1} H_{ji} E_i (C_A^* - C_A^0) \quad (5)$$

$$LdC_K^0 = R_K aA dz \quad k \text{ ( gas terlarut ) :} \quad (6)$$

$$\frac{dC_K^0}{dz} = \frac{R_K aA}{L}$$

(7)

Persamaan (7) diselesaikan dengan metode kolokasi orthogonal :

$$C_{Kj} = C_{Km} + \frac{Z_T}{H_T} \sum_{i=0}^{NC-1} H_{ji} (C_K^* - C_K^0)$$

#### Sistem II

$$CO_2: G_m [Y_A - Y_{Aout}] = \frac{L}{v_B} [C_B^m - C_B^0]$$

$$k \text{ ( gas terlarut ) : } G_m [Y_K - Y_{Kout}] = L [C_K^m - C_K^0]$$

Konsentrasi  $CO_2$  pada interface :

$$C_{Ai} = \frac{k_G Y_{Ai} P + E k_L C_{A0}}{E k_L + k_G H_e}$$

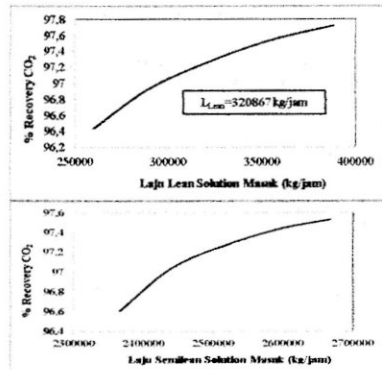
Penyelesaian persamaan-persamaan aljabar non-linier yang diperoleh dari metode kolokasi orthogonal diselesaikan dengan metode pendekatan berturut-turut, akhirnya harga % Pemulihan  $CO_2$  dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\% \text{Recovery} = 1 - \frac{Y_{Aout}}{Y_{Am}}$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi ini bertujuan untuk mempelajari secara teoritis kinerja *packed column* untuk absorpsi  $CO_2$  dari gas sintesa dengan larutan  $K_2CO_3$  dan katalis ACT-1 dengan memperhatikan kelarutan gas-gas yang lain, yang dinyatakan dengan % Pemulihan  $CO_2$ . Penelitian ini dilaksanakan dengan membuat program simulasi untuk proses absorpsi gas  $CO_2$  disertai reaksi reversibel dalam kondisi *isothermal*. Sistem yang dipelajari adalah *packed column* di suatu industri petrokimia. Sebagai variabel adalah laju alir absorben, suhu absorben dan tekanan absorber. Kemudian hasil simulasi divalidasi dengan data lapangan plant komersial.

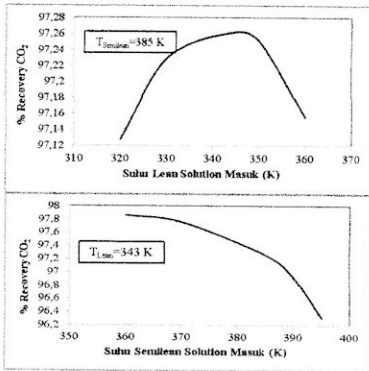
### 1. Pengaruh Laju Alir Absorben (*Lean solution* dan *Semilean solution*) terhadap % Pemulihan $CO_2$



Gambar 2. Pengaruh laju alir absorben terhadap % Pemulihan  $CO_2$ , (a) Laju *Lean solution* (b) Laju *Semilean solution*

Kenaikan laju alir absorben memberikan pengaruh nyata terhadap kenaikan % Pemulihan  $CO_2$ . Hal ini

menunjukkan bahwa tahanan sisi liquid memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap proses penyerapan CO<sub>2</sub> kedalam larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Meskipun pada simulasi ini tahanan perpindahan massa sisi gas tetap diperhitungkan.

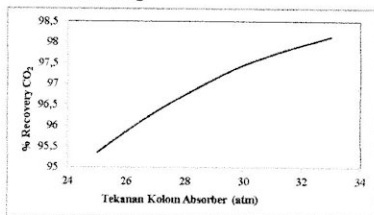


Gambar 3. Pengaruh temperatur terhadap % pemulihan CO<sub>2</sub>, (a) Suhu *Lean solution* (b) Suhu *Semilean solution*

## 2. Pengaruh Temperatur (*Lean solution* dan *Semilean solution*) terhadap %Pemulihan CO<sub>2</sub>

Temperatur memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap %Pemulihan CO<sub>2</sub>. Kenaikan temperatur akan menyebabkan kenaikan diffusivitas dan kostanta kecepatan reaksi yang tentunya juga akan menyebabkan terjadinya kenaikan laju penyerapan gas CO<sub>2</sub> kedalam larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Namun, kenaikan temperatur ini akan menurunkan kelarutan gas. Penurunan kelarutan gas akan berakibat pada penurunan laju penyerapan. Dari gambar3 diketahui bahwa pada temperatur kurang dari 343 K kecepatan reaksi dan laju diffusivitas besar menyebabkan % Pemulihan CO<sub>2</sub> naik, namun setelah temperatur lebih tinggi dari 343 K terjadi penurunan kelarutan lebih tinggi daripada kecepatan reaksi dan laju diffusivitas, yang menyebabkan % Pemulihan CO<sub>2</sub> menurun. Pada temperatur 343 K diperoleh % pemulihan CO<sub>2</sub> sebesar 97,2606 %.

## 3. Pengaruh Tekanan Absorber terhadap % Pemulihan CO<sub>2</sub>

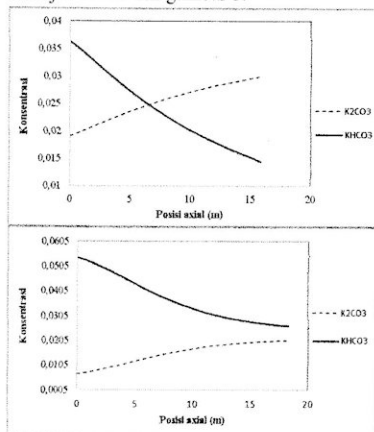


Gambar 4. Pengaruh tekanan absorber terhadap % pemulihan CO<sub>2</sub>

Bahwa semakin tinggi tekanan operasi kolom absorpsi maka %Pemulihan CO<sub>2</sub> juga semakin tinggi. Dalam range tekanan 25 atm hingga 33 atm memberi pengaruh yang cukup berarti pada %Pemulihan CO<sub>2</sub>. Hal ini disebabkan karena dengan semakin tingginya tekanan, maka kelarutan CO<sub>2</sub> dalam larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> juga akan semakin besar. Sehingga konsentrasi CO<sub>2</sub> menjadi semakin besar, apabila tekanan dinaikkan maka reaksi akan bergeser ke kanan ( ke arah produk). Kelarutan ini ditentukan dengan menggunakan hukum Henry.

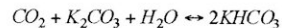
## 4. Distribusi Konsentrasi Liquid didalam *Packed Column*

Distribusi konsentrasi liquid didalam *packed column* ditunjukkan dalam gambar 5.



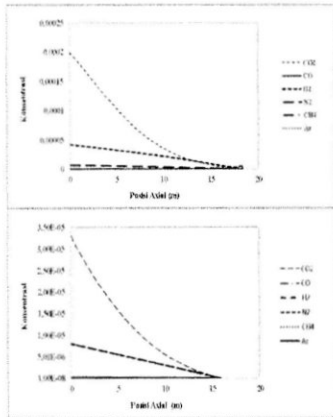
Gambar 5. Distribusi konsentrasi liquid, (a) *packed column* atas (b) *packed column* bawah

Gambar 5. menunjukkan bahwa konsentrasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> mengalami penurunan, dimana konsentrasi awal K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> sebesar 0,029986 dan konsentrasi K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> yang keluar dari kolom absorber sebesar 0,0069494. Hal ini disebabkan karena larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> tersebut bereaksi dengan gas CO<sub>2</sub> dalam *packed column* membentuk senyawa KHCO<sub>3</sub>. Sehingga konsentrasi KHCO<sub>3</sub> mengalami kenaikan dari 0,014393 menjadi 0,053853. Reaksi antara CO<sub>2</sub> dan larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> tersebut sebagai berikut :



## 5. Distribusi Konsentrasi Gas didalam *Packed Column*

Distribusi konsentrasi gas didalam *packed column* dari hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 6 ( $z=0$ )



Gambar 6. Distribusi konsentrasi gas dalam liquid, (a) packed column atas (b) packed column bawah

Gambar 6. menunjukkan bahwa konsentrasi gas CO<sub>2</sub> dalam liquid mengalami kenaikan karena terserap oleh larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> yaitu dari 0 (tidak ada CO<sub>2</sub> didalam larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) menjadi 0,00019842, disamping itu komposisi gas lain seperti CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> dan Ar juga mengalami kenaikan. Larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> yang digunakan sebagai absorben masuk kedalam kolom pada bagian atas kolom dan awalnya tidak mengandung CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> maupun argon, tetapi pada saat keluar dari absorber larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> tersebut mengandung gas CO sebesar 5,9588e-008, H<sub>2</sub> sebesar 4,1834e-005, N<sub>2</sub> sebesar 6,9029e-006, CH<sub>4</sub> sebesar 1,7063e-007 dan argon sebesar 1,2599e-007. Hal ini menunjukkan bahwa tidak hanya gas CO<sub>2</sub> saja yang larut dalam larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, tetapi gas-gas yang lain seperti CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> dan Ar juga ikut larut dalam larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

#### Validasi Data

Dari hasil fitting parameter diperoleh data konstanta kesetimbangan untuk katalis ACT-1 dimana untuk persamaan  $k_C = Ae\left(\frac{-2868,6462}{T}\right) \text{cm}^3/\text{mol.s}$  diper-

oleh nilai A sebesar 26787699274. Dari hasil validasi untuk tekanan absorber 29,4 atm dengan laju alir lean 320867 kg/jam, T = 343 °K dan semilean 2514122 kg/jam, T = 385 °K diperoleh % Pemulihan CO<sub>2</sub> sebesar 97,2606% sedangkan data pabrik dengan variabel yang sama sebesar 97,4328%.

#### SIMPULAN

Pada penelitian ini telah dikembangkan program simulasi proses absorpsi CO<sub>2</sub> dengan absorben K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> berkatalis ACT-1 dalam packed column skala industri.

Penelitian ini mendapatkan data konstanta kecepatan reaksi untuk absorpsi CO<sub>2</sub> kedalam larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> berkatalis ACT-1 yaitu :

$$k_C = 26787699274e\left(\frac{-2868,6462}{T}\right) \text{cm}^3/\text{mol.s}$$

Hasil prediksi simulasi untuk tekanan absorber 29,4 atm dengan laju alir lean 320867 kg/jam, T = 343 °K dan semilean 2514122 kg/jam, T = 385 °K menunjukkan nilai % pemulihan CO<sub>2</sub> sebesar 97,2606% sedangkan data pabrik menunjukkan nilai 97,4328%. Pada penelitian ini telah dikaji secara teoritis pengaruh berbagai variabel proses seperti laju alir Lean solution dan Semilean solution, suhu, dan tekanan terhadap % Pemulihan CO<sub>2</sub>. Sebagai contoh kenaikan tekanan dari 25 atm menjadi 33 atm meningkatkan % Pemulihan CO<sub>2</sub> dari 95,3503% menjadi 98,1383% untuk laju alir lean 320867 kg/jam, laju alir semilean 2514122 kg/jam, suhu lean masuk 343 K, dan suhu semilean masuk 385 °K.

#### DAFTAR NOTASI

- A : luas penampang kolom, m<sup>2</sup>
- C<sub>A</sub><sup>0</sup>: konsentrasi gas CO<sub>2</sub> dalam badan liquida awal, mol.m<sup>-3</sup>
- C<sub>Ai</sub>: konsentrasi gas CO<sub>2</sub> dalam interface, mol.m<sup>-3</sup>
- C<sub>Ae</sub>: konsentrasi gas CO<sub>2</sub> berkesetimbangan dalam liquida, mol.m<sup>-3</sup>
- C<sub>B</sub><sup>0</sup>: konsentrasi awal reaktan, mol.m<sup>-3</sup>
- E : enhancement factor
- G : kecepatan gas superficial, gmol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>; aliran total molar gas, mol s<sup>-1</sup>
- k<sub>G</sub> : koefisien perpindahan massa sisi gas, mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>
- k<sub>c</sub> : konstanta kecepatan reaksi katalitik, lt.gmol<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup> atau cm<sup>3</sup>.gmol<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>
- k<sub>L</sub> : koefisien perpindahan massa sisi liquida, mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>
- L: laju alir total molar liquida, mol/s; kecepatan superficial liquida, gmol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>
- P<sub>A</sub>: tekanan parsial gas CO<sub>2</sub>, Pa
- r : kecepatan reaksi gas persatuan volume, mol.m<sup>-3</sup>.s<sup>-1</sup>
- $\bar{r}$ : laju absorpsi rata-rata dalam waktu kontak t, mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>
- T : temperatur, K
- y : mol fraksi fasa gas
- Y: perbandingan antara mol CO<sub>2</sub> fasa gas dan total mol gas masuk kolom
- ∅ : volumetric holdup, cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadi, M., Gomes dan V.G., Ngian, K., 2008. "Advanced modelling in performance optimization for reactive separation in industrial CO<sub>2</sub> removal", Sep.Purif. Tech. 63, 107-115.
- Astarita, G., Savage, D.W. dan Longo J.M., 1981, "Promotion of CO<sub>2</sub> mass transfer in carbonate solutions", Chem. Eng. Sci. 36, 581-588.

- Augugliaro, V. dan Rizzuti, L., 1987, "Kinetics of carbon dioxide absorption into catalysed potassium carbonate solutions", *Chem.Eng.Sci.* 42, 2339-2343.
- Bartoo, R.K. dan Ruzicka, S.J., 1991, "Recent improvements to the benfield process extend its use", Paper presented at nitrogen '91 conference.
- Benson, Field J.H. dan Haynes W.P., 1956, "Improved process for CO<sub>2</sub> absorption uses hot carbonate solutions", *Chem. Eng. Prog.* 52, 433-438.
- Bosch, H., Versteeg, G.F. dan Van Swaaij, W.P., 1989, "Gas-liquid mass transfer with parallel reversible reactions-II. Absorption of CO<sub>2</sub> into amine-promoted carbonated solution", *Chem. Eng. Sci.* 44 (11), 2735-2743.
- Cullinane, J.T. dan Rochelle, G.T., 2004, "Carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by piperazine", *Chem. Eng.Sci.* 59, 3619-3630.
- Cullinane, J.T., 2005, "Thermodynamics and kinetics of aqueous piperazine with potassium carbonate for carbon dioxide absorption", Dissertation, University of Texas, Austin.
- Danckwerts, P. V., 1970, *Gas-Liquid Reaction*, McGraw-Hill, New York.
- Plaza, J.M. dan Rochelle, G.T., 2011, "Modeling pilot plant results for CO<sub>2</sub> capture by aqueous piperazine", *Energy Procedia* 4, 1593-1600.
- Rao, A.B. dan Rubin, E.S., 2002, "A technical, economic, and environmental assessment of amine-based CO<sub>2</sub> capture technology for power plant green-house gas control", *Environ. Sci. Tech.* 36,4467-4475.
- Rahimpour, M.R. dan Kashkool, A.Z., 2004b, "Enhanced carbon dioxide removal by promoted hot potassium carbonate in a split-flow absorber", *Chem. Eng. Proc.* 43, 857-865.
- Rochelle, G.T. dan Dang, H., 2001. "CO<sub>2</sub> absorption rate and solubility in monoethanolamine/piperazine/water". *Proseding pada The First National Conference on Carbon Sequestration*, Washington, DC, 14-17 Mei.
- Sari, S. dan Kumalasari, L., 2009. "Simulasi Pemulihan CO<sub>2</sub> dari gas sintesa dengan absorben K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dan katalis DEA dalam packed column". Skripsi, Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Kimia, ITS, Surabaya.
- Tseng, P.C., Ho, W.S. dan Savage, D.W., 1988. "Carbon dioxide absorption into promoted carbonate solutions", *AIChE Journal* 34 (6), 922-931.
- Weisenberger, S dan Schumpe, A., (1996), "Estimation of gas solubilities in salt solutions at temperatures from 273 K to 363 K, *AIChE Journal* 42 (1996), 298-300.
- Yi, F., Kui Zou, H., Wen Chu, G., Shao, L., Feng Chen, J., (2009), "Modeling and experimental studies on absorption of CO<sub>2</sub> by benfield solution in rotating packed bed", *Chem. Eng. J.* 145, 377-384.