

PENGARUH BEBAN GAS TERHADAP PENYERAPAN GAS CO₂ DALAM ABSORPSI CAMPURAN UDARA DAN GAS CO₂ OLEH LARUTAN K₂CO₃ PADA PACKED COLUMN

INFLUENCE OF GAS LOADING ON CARBON DIOXIDE ABSORPTION IN AIR AND CARBON DIOXIDE MIXTURE BY POTASSIUM CARBONATE SOLUTION IN A PACKED COLUMN

Kusnarjo, Radya P. Wijaya, Kuswandi, Susianto, dan Ali Altway

Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa

Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS

Kampus ITS Jl. Arief Rachman Hakim Surabaya

Telpon (031) 5946240, email: kusnar@telkom.net

Abstract

This research was aimed to study the influence of gas loading on CO₂ absorbance quantity in CO₂ and air flow. Potassium carbonate solution was contacted counter currently in a 10 cm diameter and 150 cm high raschig ring packed column. The packing was prepared from 1.0 cm diameter and 2 cm high aluminium alloy, which was filled in a column of 100 cm high. CO₂ was applied from the bottom and K₂CO₃ solution was added counter currently from the top of the column. The inlet gas consisted of pure CO₂ and mixture of CO₂ and air containing 20% mole CO₂. The gas flow rate varied from 8 to 24 L/minute, and the liquid flow rate was varied from 3 to 7 L/minute. The concentration of K₂CO₃ in liquid inlet varied from 1 M and 1,5 M. The research result showed that in pure CO₂ and 1M K₂CO₃ concentration, the CO₂ absorption efficiency increased from 3.79 to 13.54 % and in 1.5 M K₂CO₃ concentration, the CO₂ absorption efficiency increased from 3.90 to 13.80 %. In CO₂ concentration of 20% with K₂CO₃ solution of 1 M concentration the CO₂ absorption efficiency increased from 7.88 to 16.37 %. The CO₂ absorption increased from 11.22 to 16.87% in K₂CO₃ concentration of 1.5 M.

Keywords: CO₂ gas, K₂CO₃ solution, absorption, packed column.

1. PENDAHULUAN

CO₂ banyak dihasilkan dari beberapa kegiatan alam maupun manusia dan kebanyakan semuanya dibuang ke atmosfer. CO₂ dalam jumlah yang besar di atmosfer akan mengganggu lingkungan, terutama pemanasan global. Kegiatan manusia yang dapat menjadi penyebab timbulnya gas CO₂ antara lain: hasil pembakaran bahan bakar otomotif, operasi pabrik, pembangkit tenaga, dan lain-lain. Diperkirakan produksi CO₂ dari pembakaran gas alam sebesar 0,45 kg/kWh, bahan bakar petroleum sebesar 0,80kg/kWh dan dari bahan bakar batubara 0,96 kg/kWh (Cullinane, 2005). Selain kegiatan manusia

kegiatan alam dapat menambah jumlah CO₂ yang terbuang ke atmosfer antara lain kegiatan gunung berapi, kebakaran hutan, penguraian biomass, dan lain sebagainya. Banyak usaha yang dilakukan untuk menangkap CO₂ yang lepas ke udara, misalnya dengan menggunakan membran, *cryogenics*, adsorpsi dan absorpsi kedalam larutan kimia. Cara pemisahan dengan menggunakan membran sangat sulit dilaksanakan. Cara *cryogenics* membutuhkan tekanan tinggi, di mana CO₂ yang dihasilkan berupa larutan. Sedangkan dengan proses absorpsi kapasitasnya terlalu kecil dengan selektivitas CO₂ yang sangat rendah. Pada saat ini yang paling banyak digunakan untuk menangkap CO₂ adalah proses absorpsi.

Absorpsi adalah penyerapan gas ke dalam cairan yang terjadi di dalam kolom baik tanpa maupun dengan *packing*. Penyerapan dapat didasarkan pada proses pelarutan, maupun pelarutan yang disertai dengan reaksi. Dalam absorpsi gas, suatu gas yang dapat larut diabsorpsi oleh suatu *liquid*, di mana gas yang terlarut tersebut dapat terlarut dalam campurannya dengan gas *inert* lain. Untuk mengabsorpsi gas biasanya digunakan alat kontak gas dengan *solvent* yang disebut *absorber*. Hal ini bertujuan agar terjadi difusi antar fasa, atau perpindahan massa antara zat-zat yang ada dalam gas atau *liquid*. Alat ini terdiri dari sebuah kolom berbentuk silinder yang dilengkapi dengan pemasukan gas dan ruang distribusi pada bagian bawah. Sedangkan pemasukan cairan dan distributornya pada bagian atas. Gas diserap oleh suatu larutan tertentu, di mana gas yang terlarut ini bereaksi. Dengan terjadinya kontak antara gas dan *liquid* akan terjadi difusi antar fasa atau perpindahan massa antara zat-zat yang ada dalam gas atau *liquid*.

Unjuk kerja *packed column* sangat ditentukan oleh macam absorpsinya (secara fisika atau dengan reaksi kimia), jenis *packing*, tinggi *packing*, dan model aliran di dalam *packed column*. Sedangkan data lainnya dapat diperoleh dari eksperimen maupun pengembangan model atau simulasi. Dengan adanya pemanasan, reaksi akan berjalan cepat dan koefisien perpindahan massa menjadi besar. Absorpsi gas ke dalam larutan absorben reaktif dipengaruhi oleh banyak variabel seperti perbandingan laju molar cair-gas, konsentrasi absorben yang masuk, tipe dan ukuran *packing*, aktifator, dan lain-lainnya. Kelarutan K_2CO_3 sangat tinggi dan harganya murah, sehingga K_2CO_3 biasa digunakan untuk mengabsorpsi gas CO_2 dan H_2S .

Banyak penelitian yang dilakukan untuk memisahkan CO_2 dari gas dengan cara absorpsi *counter current flow* (aliran berlawanan arah) di dalam *packed column*

dengan reaksi *reversible*. Studi absorpsi gas disertai reaksi kimia di dalam *packed column* pada umumnya menggunakan anggapan aliran *plug flow*. Dalam aplikasi absorpsi gas, beberapa sistem tidak sesuai dengan asumsi tersebut dan perhitungan menjadi tidak akurat. Absorpsi gas CO_2 ke dalam larutan KOH memberikan parameter unjuk kerja *packed column* (Astarita, 1963a dan Astarita, 1963b). Pada absorpsi CO_2 menggunakan methyldiethanol-amine (MDEA) dalam *packed column*, jumlah gas yang diserap dikendalikan oleh difusi reaksi cepat dan tidak dipengaruhi oleh tahanan gas-film (Pacheco *et al.*, 2000). Sanyal *et al.* (1988) menyatakan bahwa distribusi aliran, temperatur, dan konsentrasi dapat diprediksi dengan metoda simulasi pada absorpsi CO_2 . Simulasi tersebut dilakukan pada gas sintesa amonia menggunakan media larutan *amine* dengan *promoted* K_2CO_3 . Linek dan Vaclav (1990) menggunakan pengembangan model untuk memprediksi tinggi *packing* di dalam kolom. Linek *et al.* (1994) juga menyatakan laju alir *absorpsi* dengan reaksi kimia bolak-balik dapat diprediksi menggunakan metoda simulasi. Bishnoi dan Rochelle (2000) yang melakukan penelitian kelarutan fisika CO_2 ke dalam larutan methyldiethanolamine, menyatakan bahwa kelarutan akan naik dengan naiknya kekuatan ion. Kerr (2002) menyatakan bahwa unjuk kerja absorber tipe *packed column* dapat diprediksi dengan cara simulasi maupun eksperimen menggunakan metoda numerik untuk sistem beberapa reaksi dengan beberapa orde dan *reversible*. Dapat disimpulkan bahwa kebanyakan absorpsi gas CO_2 banyak menggunakan absorben MEA atau MDEA, KOH, alkanolamine, MDEA-piperazine, dan K_2CO_3 .

Dari beberapa penelitian terdahulu dapat disimpulkan bahwa masih kurangnya dilakukan studi pengaruh beban gas CO_2 terhadap jumlah penyerapan gas CO_2 untuk reaksi *reversible*. Penyerapan tersebut terjadi pada kondisi non *isothermal* untuk absorpsi CO_2 dengan larutan Benfield dalam *packed*

column. Dengan demikian perlu dilakukan penelitian beban gas CO₂ terhadap jumlah penyerapan gas CO₂. Semua data yang diperoleh digunakan untuk analisis sistem absorpsi gas ke dalam absorben reaktif untuk optimasi proses dan unjuk kerja *packed column*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan acuan pada industri yang menggunakan proses absorpsi terutama CO₂. Absorpsi kimia adalah absorpsi yang disertai reaksi kimia antara gas terlarut dan *liquid*. Absorpsi ini dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu kelarutan gas yang terlarut dan reaksi kimia. Laju absorpsi tergantung pada konsentrasi gas yang terabsorpsi, jenis reaksi serta orde reaksinya, dan beban gas di dalam absorber. Beban gas didefinisikan sebagai berat gas persatuan waktu, persatuan luas penampang, dan volume *packing* seperti yang terlihat pada persamaan (1).

$$w = \frac{Q_G}{AV_p} \dots\dots\dots (1)$$

di mana: *w* = beban gas, *Q_G* = laju alir gas(L/menit), *A* = luas penampang kolom (cm²), dan *V_p* = volume *packing* (cm³). Pada kondisi ini, berlaku persamaan seperti yang terlihat pada persamaan (2), di mana *r* (*x,t*) adalah laju per unit volume *liquid* pada waktu *t* dan jarak *x* di bawah permukaan.

$$D_A \frac{\partial^2 C_{CO_2}}{\partial x^2} = \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} + r(x,t) \dots\dots\dots (2)$$

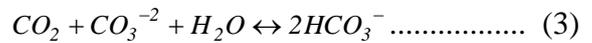
$$r = k_2 \left[C_{OH^-} \cdot C_{CO_2} - \frac{1}{K} C_{HCO_3^-} \right] \dots\dots\dots (6)$$

$$D_{CO_2} \frac{\partial^2 C_{CO_2}}{\partial x^2} = \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} + k_2 \left[C_{OH^-} \cdot C_{CO_2} - \frac{1}{K} C_{HCO_3^-} \right] \dots\dots\dots (7)$$

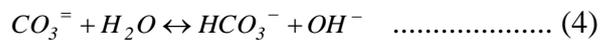
$$D_{OH^-} \frac{\partial^2 C_{OH^-}}{\partial x^2} = \frac{\partial C_{OH^-}}{\partial t} + zk_2 \left[C_{CO_2} \cdot C_{OH^-} - \frac{1}{K} C_{HCO_3^-} \right] \dots\dots\dots (8)$$

Dalam menentukan komposisi kesetimbangan pada sistem reaktif membutuhkan sebuah kondisi dan informasi spesifik mengenai komponen yang ada dalam sistem tertutup. Di mana konstanta kesetimbangan untuk tiap-

di mana: *D_A* = bilangan dispersi gas CO₂. Pada absorpsi gas CO₂ oleh larutan K₂CO₃ biasanya disertai reaksi kimia *reversible* orde dua dengan kondisi *non-isothermal*, seperti yang terlihat pada reaksi (3).



Reaksi (3) terbagi dalam dua tahap. Tahap pertama adalah hidrolisis kalium karbonat menjadi bikarbonat seperti yang terlihat pada reaksi (4). Sedangkan pada tahap kedua terjadi pembentukan kalium bikarbonat dari reaksi CO₂ dengan kalium hidroksida yang terbentuk dari proses hidrolisis seperti yang terlihat pada reaksi (5).



Menurut Danckwertz (1970) reaksi (4) berjalan instan sehingga setimbang setiap saat. Reaksi (5) berjalan cepat dan dapat meningkatkan perpindahan massa meskipun konsentrasi ion hidroksil kecil. Cullinane (2005) menyatakan reaksi (5) adalah reaksi pengontrol atau sebagai *rate determining step* sehingga laju reaksi dinyatakan sebagai orde dua.

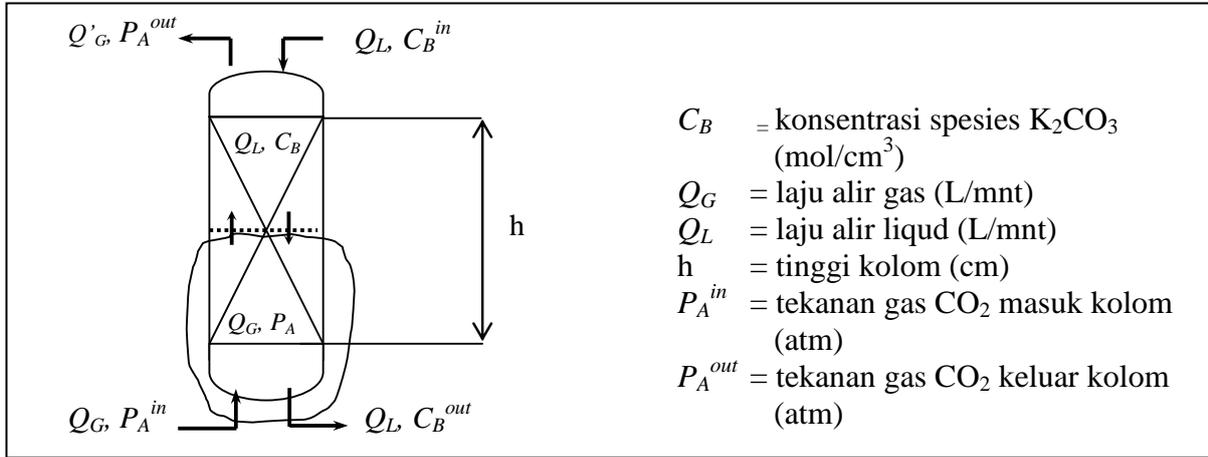
Besar laju reaksi dan koefisien difusivitas dinyatakan dengan persamaan (6), (7), dan (8).

tiap reaksi dalam sistem tertutup diberikan oleh Smith dan Abott (1996).

Dalam *packed column* jumlah gas yang dapat diserap oleh absorben dapat diketahui dengan

menggunakan neraca massa. Tentunya konsentrasi masing-masing bahan perlu diketahui atau dianalisis baik yang masuk maupun keluar kolom. Fasa gas jumlah bahan gas yang dapat diserap dapat dinyatakan

dengan tekanan parsial bahan tersebut dan di dalam absorben dengan konsentrasi bahan. Neraca massa bahan dalam *packed column* seperti yang terlihat pada Gambar 1 dan dinyatakan dalam persamaan (9).



Gambar 1. Massa dan Komposisi Bahan di Dalam absorber Menggunakan Packing

$$G \left[\frac{P_A^{in}}{P - P_A^{in}} - \frac{P_A}{P - P_A} \right] = \frac{L}{2} [C_B - C_B^{out}] \dots\dots\dots(9)$$

Fraaksi mol gas CO_2 di dalam aliran gas keluar dinyatakan sebagai P_A^{out} (atm) yang dapat diperoleh dari neraca bahan seperti yang terlihat pada persamaan (9). Dengan diketahuinya konsentrasi gas masuk dan keluar, maka fraksi gas CO_2 yang terserap dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (10). Untuk campuran gas CO_2 dan udara, perhitungan jumlah penyerapan gas CO_2 oleh larutan K_2CO_3 dihitung dengan cara yang sama dengan perhitungan penyerapan gas CO_2 murni.

$$\eta = \frac{\left[\frac{y_{Ab-in}}{1 - y_{Ab-in}} \right] - \left[\frac{y_{Ab-out}}{1 - y_{Ab-out}} \right]}{\left[\frac{y_{Ab-in}}{1 - y_{Ab-in}} \right]} \dots\dots\dots(10)$$

di mana:

- η = jumlah gas CO_2 terserap
- y_{Ab-in} = fraksi mol gas CO_2 yang masuk
- y_{Ab-out} = fraksi mol gas CO_2 yang keluar

2. METODOLOGI

Untuk melaksanakan eksperimen ini terlebih dahulu disiapkan peralatan eksperimen seperti yang terlihat pada Gambar 2. Larutan *benfield* atau K_2CO_3 digunakan sebagai absorben yang akan mengabsorpsi CO_2 murni dan campuran gas CO_2 dengan udara. Gas CO_2 pada konsentrasi 100% dan 20% mol dengan laju alir tertentu dialirkan dari bagian bawah *packed column* menggunakan kompresor sampai aliran konstan. Demikian juga larutan K_2CO_3 pada konsentrasi 1 M dan 1,5 M dengan laju alir tertentu dialirkan dari bagian atas *packed column*. Sehingga larutan K_2CO_3 hanya membasahi *packing* yang ada di dalam kolom dan diharapkan mengabsorpsi gas CO_2 yang masuk dari bagian bawah kolom.

Larutan yang keluar dari bagian bawah *packed column* ditampung dalam tangki penampung dan diusahakan tidak mengalami kontak dengan udara. Kemudian larutan ini dianalisis konsentrasi $KHCO_3$ dengan cara titrasi. Demikian juga konsentrasi CO_2 yang keluar

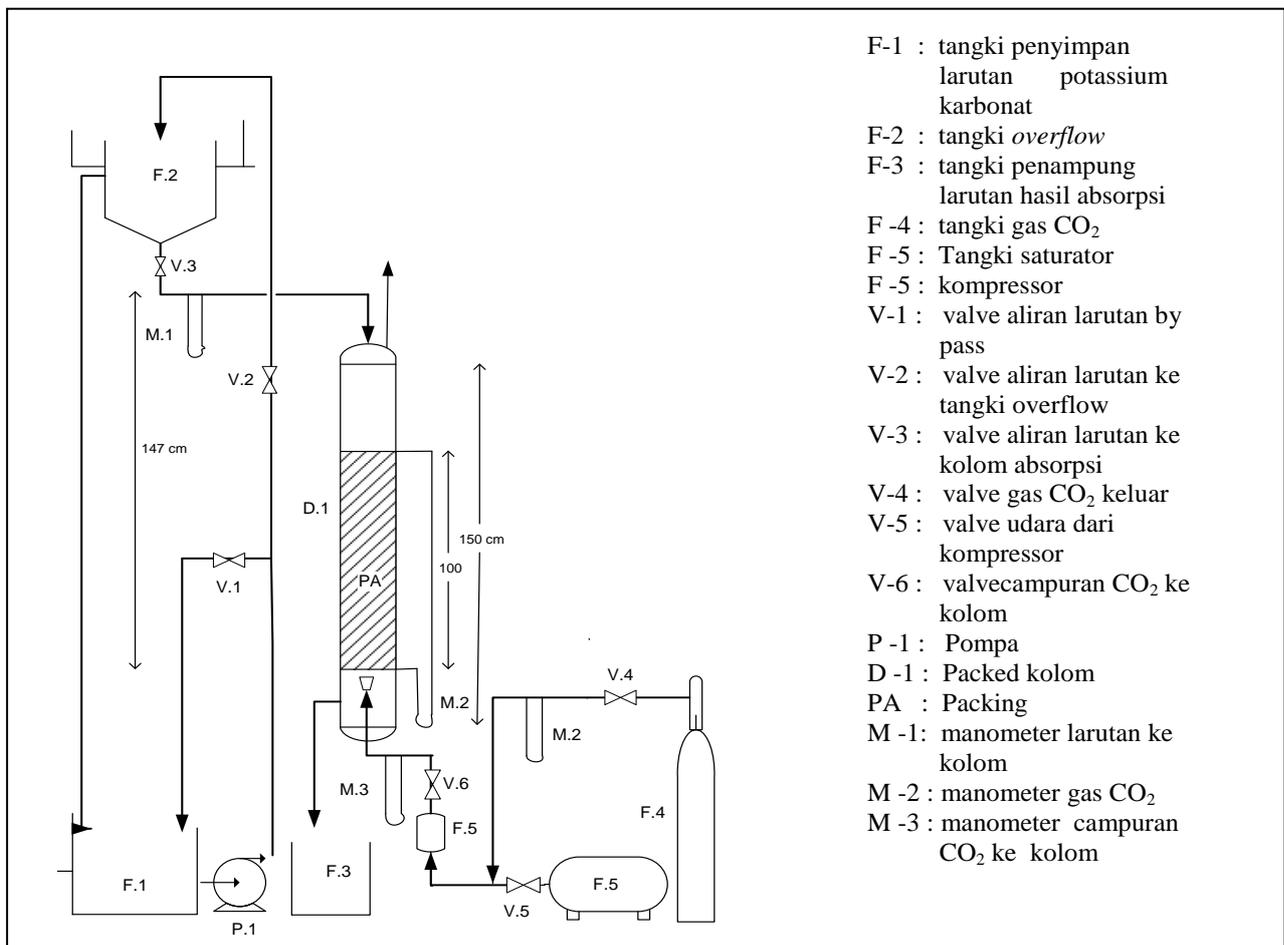
dari kolom dianalisis konsentrasinya. Percobaan di atas diulang untuk laju alir gas CO₂ murni maupun campuran CO₂ dan udara konstan dan konsentrasi serta laju air larutan K₂CO₃ yang berubah-ubah. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan akurasi data.

Larutan yang keluar dari bagian bawah *packed column* ditampung dalam tangki penampung dan diusahakan tidak mengalami kontak dengan udara. Kemudian konsentrasi KHCO₃ dalam larutan ini dianalisis dengan cara titrasi. Besar *recovery* gas CO₂ dihitung

dengan menggunakan persamaan (10). Hasil perhitungan *recovery* gas dievaluasi dan divalidasi dengan hasil penelitian sebelumnya.

Variabel Penelitian

Pada penelitian ini variabel yang digunakan adalah: (1) konsentrasi gas CO₂ sebesar 100% dan 20% mol pada temperatur 27°C dengan laju alir 12; 14; 16; 20 dan 24 L/menit, (2) konsentrasi larutan K₂CO₃: 1 M dan 1,5 M pada temperatur *liquid* 27°C dengan laju alir 3; 4; dan 5 L/menit.



Gambar 2. Skema peralatan percobaan

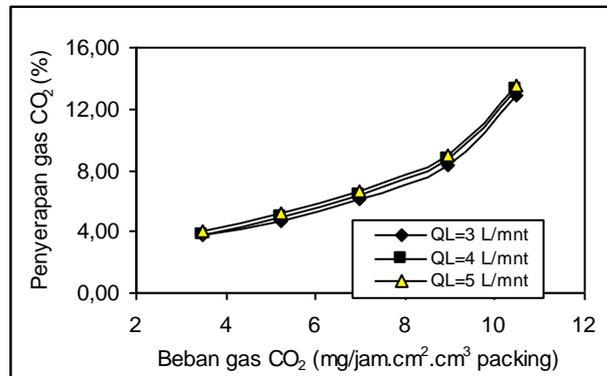
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil eksperimen yang menunjukkan hubungan antara beban gas CO₂ dengan penyerapan gas CO₂ disajikan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Pada Gambar 3 terlihat bahwa penyerapan gas CO₂ semakin naik dengan kenaikan laju alir absorben, konsentrasi

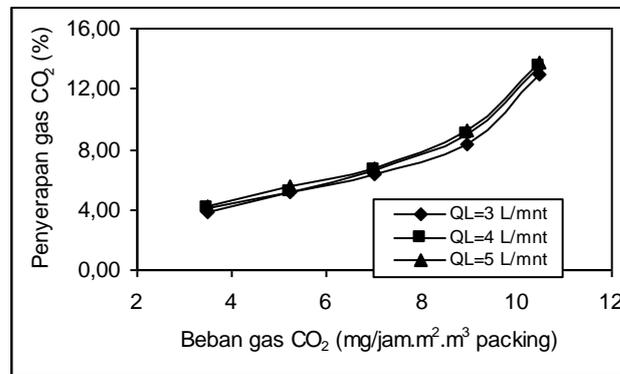
K₂CO₃, dan beban gas CO₂. Jumlah penyerapan gas CO₂ naik dari 3,79 sampai 13,54% pada laju alir larutan K₂CO₃ yang tetap dan konsentrasi larutan K₂CO₃ 1 M. Penyerapan gas CO₂ naik dari 3,9 sampai 13,8% pada konsentrasi K₂CO₃ 1,5 M seperti yang terlihat pada Gambar 4. Hal ini disebabkan semakin besar konsentrasi

absorben dan beban gas CO₂ akan semakin besar jumlah bahan yang bereaksi dalam absorpsi disertai reaksi bolak-balik. Kondisi

tersebut juga dapat dijelaskan bahwa semakin besar beban gas CO₂ maka semakin besar gas CO₂ yang diserap oleh larutan K₂CO₃.



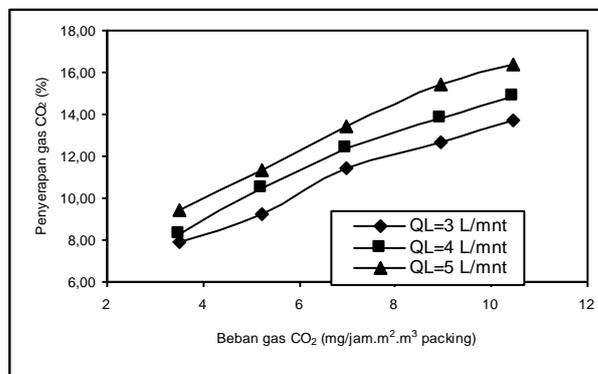
Gambar 3. Hubungan Penyerapan Gas CO₂ dengan Beban Gas CO₂ Pada CO₂ Murni dan Berbagai Laju Alir Larutan K₂CO₃, 1 M.



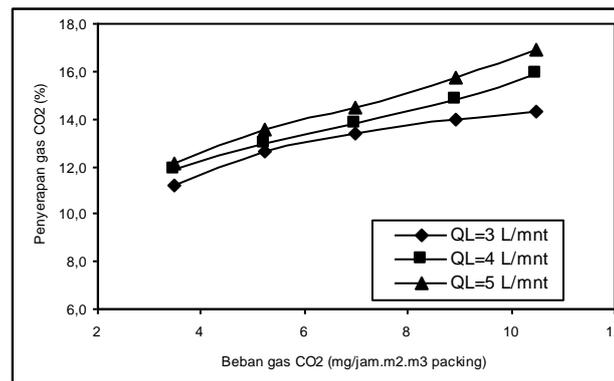
Gambar 4. Hubungan Penyerapan Gas CO₂ dengan Beban Gas CO₂ Pada CO₂ Murni dan Berbagai Laju Alir Larutan K₂CO₃ 1,5 M

Pada Gambar 5, terlihat bahwa pada campuran gas CO₂ dan udara dengan konsentrasi CO₂ 20% mol penyerapan gas CO₂ hampir sama dan akan meningkat dari 7,88 sampai 16,37 % pada konsentrasi K₂CO₃

1 M dan kenaikan laju alir larutan K₂CO₃. Pada Gambar 6 terlihat bahwa penyerapan gas CO₂ meningkat dari 11,22 sampai 16,87% pada konsentrasi K₂CO₃ 1,5 M dan kenaikan laju alir larutan K₂CO₃.



Gambar 5. Hubungan Penyerapan Gas CO₂ dengan Beban Gas CO₂ Pada Konsentrasi CO₂ 20% mol dan Berbagai Laju Alir Larutan K₂CO₃ 1 M



Gambar 6. Hubungan Penyerapan Gas CO₂ dengan Beban Gas CO₂ Pada Campuran Udara dan Gas Laju Alir Larutan K₂CO₃ 1,5 M

Jumlah penyerapan gas CO₂ pada campuran gas CO₂ dengan udara konsentrasi CO₂ 20% mol lebih besar dibandingkan dengan absorpsi gas CO₂ murni. Hal ini disebabkan karena gas CO₂ yang tidak murni memiliki ikatan molekul gas CO₂ lebih lemah dibandingkan dengan CO₂ murni. Sehingga molekul K₂CO₃ akan lebih bebas masuk diantara molekul CO₂. Kondisi tersebut menyebabkan reaksi lebih mudah terjadi dan jumlah reaktan yang bereaksi semakin besar, atau semakin besar CO₂ yang akan diserap oleh larutan K₂CO₃.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pada penyerapan gas CO₂ murni, jumlah penyerapan gas CO₂ hampir sama pada konsentrasi absorben K₂CO₃ 1 M dan 1,5 M. Sedangkan pada penyerapan campuran udara dan gas CO₂ dengan konsentrasi gas CO₂ 20% mol, jumlah penyerapan gas CO₂ akan semakin besar dengan semakin besarnya laju alir larutan K₂CO₃, konsentrasi K₂CO₃, dan beban gas CO₂ di dalam absorber. Hal ini disebabkan proses absorpsi disertai reaksi *reversible*, di mana semakin besar konsentrasi absorben dan beban gas CO₂ akan semakin besar pula reaksi yang terjadi. Dengan demikian jumlah penyerapan gas CO₂ akan semakin besar pula.

Jumlah penyerapan gas CO₂ akan semakin besar dengan semakin lamanya kontak antara *liquid* dan gas. Sehingga produk reaksi yang dihasilkan akan semakin besar. Hasil

penelitian yang telah dilakukan oleh Yuniar dkk (2001), menunjukkan bahwa jumlah penyerapan gas CO₂ sebesar 70-98%, atau 3 kali lebih besar dibandingkan dengan jumlah penyerapan gas CO₂ hasil eksperimen ini. Hal ini disebabkan karena pada penelitian Yuniar dkk (2001), tinggi *packing* di dalam kolom yang digunakan setinggi 200 cm sampai 1350 cm. Sedangkan pada penelitian ini hanya 100 cm. Dengan ketinggian 200 sampai 1350 cm menyebabkan waktu kontak penyerapan menjadi lebih lama dibandingkan dengan waktu kontak yang digunakan pada penelitian ini.

4. KESIMPULAN

Salah satu alternatif untuk penanggulangan pencemaran gas CO₂ dapat dilakukan dengan cara mengabsorpsi gas atau campuran gas dan udara menggunakan absorben larutan K₂CO₃ di dalam *packed column*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa jumlah penyerapan gas CO₂ akan meningkat dari 3,79 sampai 13,54% pada konsentrasi absorben 1 M; dan akan naik dari 3,9 sampai 13,8% pada konsentrasi absorben 1,5. Hal ini terjadi pada penyerapan gas CO₂ murni yang menggunakan absorben K₂CO₃, dengan laju alir K₂CO₃ dan beban gas CO₂ yang semakin tinggi.

Jumlah penyerapan gas CO₂ akan naik dari 7,88 sampai 16,37 % pada konsentrasi absorben 1 M pada penyerapan campuran gas

CO₂ dengan udara konsentrasi 20% mol CO₂. Hasil tersebut terjadi pada kondisi menggunakan absorben K₂CO₃, laju alir K₂CO₃ dan beban gas CO₂ yang semakin tinggi. Pada konsentrasi absorben 1,5 M dan kondisi yang sama, jumlah penyerapan gas CO₂ akan naik dari 11,22 sampai 16,87%. Pada penyerapan campuran gas CO₂ dengan udara konsentrasi 20% mol, jumlah gas CO₂ yang diserap lebih besar dibandingkan dengan penyerapan gas CO₂ murni.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Pimpinan Jurusan Teknik Kimia FTI – ITS atas pemberian fasilitas Laboratorium selama penelitian ini dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Astarita, G. (1963a). Absorption of Carbon Dioxide into Alkaline Solutions in Packed Tower. *I&EC. Fundamentals*. 2 (4).
- Astarita, G. (1963b). Gas Absorption with Zero-Order Chemical Reaction. *I&EC., Fundamentals*. 2 (4).
- Bishnoi, S. dan Rochelle, G.T. (2000). Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Piperazine Reactor Kinetics, Mass transfer and Solubility. *Chem Eng. Sci.* 55(22). 5531-5543.
- Cullinane, J. T., (2002). Carbon Dioxide absorption in Aqueous Mixtures of Potassium Carbonate and Piperazine. M. S. Thesis. The University of Texas at Austin, Austin.
- Danckwertz F.R.S.P.V. (1970). Gas Liquid Reaction. McGraw Hill Book Company, New York.
- Kerr C.R. (2002). A method for predicting the performance of packed columns operating with a reactive scrubbing liquid that control gaseous air pollutants. *Air Waste Management Association*.52 (4). pp.396-399.
- Linek dan Vaclav (1990). Verification of The Design Methods for Industrial Carbon Dioxide-Triethanolamine Absorbers: Laboratory Differential Simulation and Computational Methods. *Ind.Eng.Res.*, 29 (9).
- Linek V., Sinkule, J. dan Havelka, P. (1994). Emperical Design Methods of Industrial Carbon Dioxide –Mixed Solvent Absorbers with Axial Dispersion in Gas. *Industrial and Engineering Chemistry*. 33. pp. 2731-1737.
- Pacheco, M.A., (1998). Mass Transfer, kinetic and rate-based modelling of reactive absorptions. Ph.D. dissertation. The University of Texas at Austin, Austin.
- Pacheco, M.A., Kaganoi, S., dan Rochelle, G.T. (2000). Absorption into aqueous mixtures of diglycolamine and methyl – diethanolamine. *Chemical Engineering Science*. 55(21). 4789-4825.
- Sanyal, D., Vasishtha, N. dan Saraf, D.N. (1988). Modeling of Carbon Dioxide Absorber Using Hot Carbonate Process. *Ind.Eng.Chem.Res.* 27 (11).
- Smith J.M., Van Ness dan H.C. Abbot, M.M. (1996). Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics. Mc. Graw – Hill 5th International Edition, Singapore
- Yuniar, Erlie, dan Altway (2001). Simulasi Absorbs gas disertai reaksi kimia irreversible orde dua pada packed column dalam kondisi non-isothermal. *Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses*. UNDIP, Semarang.