
KAJIAN ULANG TRANSFER MASSA DISERTAI REAKSI KIMIA PADA ABSORPSI REAKTIF GAS CO₂ PADA PACKED COLUMN

Ali Altway, Susianto, Kuswandi, Kusnaryo
Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya
email: alimohad@chem-eng.its.ac.id

Abstrak

Artikel ini mengkaji ulang penelitian-penelitian yang telah dilakukan mengenai simulasi enhancement factor absorpsi disertai reaksi reversible order dua kondisi non-isothermal dan pemodelan packed column untuk absorpsi gas CO₂ kedalam larutan K₂CO₃ pada packed column. Harga enhancement factor diprediksi dengan menggunakan model eddy diffusivity (model King untuk perpindahan massa antar fasanya). Sistem persamaan diferensial yang dibentuk dari pemodelan ini diselesaikan dengan metoda Kolokasi Ortogonal. Hasil prediksi harga E dari penelitian ini sangat mendekati hasil prediksi menggunakan model Penetrasi oleh Vas Bhat (1997). Penelitian pemodelan packed column dilaksanakan secara eksperimen dan simulasi. Penelitian secara eksperimen dilaksanakan untuk validasi hasil simulasi. Bahan yang digunakan adalah campuran CO₂ dan udara serta larutan potasium karbonat. Larutan potasium karbonat dialirkan kedalam packed column dari atas dan dikontakkan secara berlawanan arah dengan aliran campuran CO₂-udara dari bawah. Cairan keluar kolom dianalisa dengan titrasi. Sedangkan percobaan simulasi dilaksanakan dengan mengembangkan model neraca massa dan energy mikroskopik pada kolom. Sistem persamaan diferensial order satu yang dihasilkan diselesaikan dengan metoda Rung Kutta order empat. Solusi model ini memerlukan informasi mengenai laju transfer massa antar fasa gas-liquid yang dalam hal ini menggunakan model King. Data kelarutan CO₂, data perpindahan massa, data kinetika dan kesetimbangan reaksi yang diperlukan pada penelitian ini diperoleh dari literatur (Danckwerts, 1970; Kohl and Riesenfeld, 1985; dan Treyball, 1981). Pada penelitian ini dipelajari pengaruh laju alir absorben dan konsentrasi K₂CO₃ dalam larutan absorben masuk terhadap persen penyisihan gas CO₂. Deviasi antara hasil prediksi simulasi dan data percobaan pada penelitian ini dibawah 10% untuk laju alir absorben dari 3 sampai dengan 5 liter/menit dan untuk laju alir 5 sampai dengan 7 liter menit deviasi nya antara 10-30%.

Kata kunci: perpindahan massa, eddy diffusivity, absorpsi, non-isothermal, packed column

Abstract

This article reviewed researches have been carried out concerning simulation of enhancement factor for absorption accompanied by second order chemical reaction under non-isothermal condition and modeling of packed column for CO₂ absorption in K₂CO₃ solution. The value of enhancement factor was predicted using eddy diffusivity model (King model) for describing interface mass transfer phenomena. System of differential equations developed in this modeling was solved with Orthogonal Collocation method. The value of E predicted from this research agrees very well with that predicted using Penetration model (Higbie model) by Vas Bhat (1997). The researches concerning packed column modeling was carried out experimentally and theoretically. Experimental works were carried out to validate theoretical prediction. Material studied in this research was CO₂ –air mixture and potassium carbonate solution. Potassium carbonate solution was fed into top of the column and the solution was contacted counter currently with rising CO₂-air mixture stream. The liquid leaving the column was analyzed by titration. Theoretical

studies were carried out by developing microscopic mass and energy balance model on the packed column. The resulted system of first order differential equations were solved using Forth order Runge Kutta method. The solution of this model requires information concerning rate of gas-liquid interface mass transfer where King model was used in this study. Mass transfer, CO₂, solubility, kinetics, and reaction equilibrium data required in this theoretical study were obtained from literatures (Danckwartz, 1970; Kohl and Riesenfeld, 1985; and Treyball, 1981). In this research, the effect of absorbent flow rate and the concentration of K₂CO₃ in the inlet absorbent on percent recovery of CO₂ gas was studied. Deviation between simulation prediction results and experimental data was below 10% for absorbent flow rate of 3 to 5 liter/menit and for absorbent flow rate of 5 to 7 liter/ menit the deviation was between 10 and 30%.

Key words: mass transfer, eddy diffusivity, absorption, non-isothermal, packed column

1. Pendahuluan

Gas CO₂ merupakan salah satu gas rumah kaca yang berdampak pada pemanasan global bila terlepas ke atmosfer. Terdapat berbagai sumber gas CO₂ misal terdapat didalam gas alam, atau merupakan hasil samping dari berbagai proses produksi seperti pada pembuatan etanol dengan proses fermentasi, proses biodegradasi anarobik yang menghasilkan gas bio, dan berbagai proses pembakaran bahan bakar. Akhir-akhir ini pelepasan gas CO₂ ke atmosfer menjadi perhatian karena dampaknya pada pemanasan global pada tingkat yang mengkhawatirkan. Sehingga mencari metoda yang efisien untuk memisahkan dan merecover CO₂ menjadi penting. Salah satu metoda untuk memisahkan CO₂ dari campuran gas adalah proses absorpsi dan absorpsi reaktif.

Absorpsi gas CO₂ oleh air dan berbagai larutan dalam air merupakan operasi yang penting dalam industri dan banyak diminati oleh peneliti-peneliti terdahulu (Astarita, 1963; Glasscock and Rochelle, 1993; Linek and Vaclav, 1990; Qian dkk, 1995; Sanyal dkk, 1988; Tepe dan Dodge, 1943; Xu dkk, 1993). Dalam banyak aplikasi, persoalannya adalah memisah dan sekaligus merecover gas CO₂. Salah satu aplikasi adalah memisah dan merecover gas CO₂ dari gas sintesa didalam industri petrokimia karena CO₂ dapat meracuni katalis sintesa ammonia. Peralatan proses yang umum digunakan untuk absorpsi reaktif gas CO₂ adalah packed column. Proses absorpsi reaktif merupakan sistimn reaksi multi fasa, sehingga perhitungan perancangan peralatan proses ini memerlukan pengetahuan mengenai fenomena transport, kelarutan gas dalam larutan elektrolit selain informasi mengenai kinetika reaksi yang terjadi. Kajian teoritis dan eksperimental mengenai kelarutan gas dan pada khususnya gas CO₂ kedalam larutan elektrolit telah dilakukan oleh peneliti-peneliti terdahulu (Joosten dan Danckwartz, 1972; Sada dkk, 1978; Mock dkk,

1986; Little dkk, 1992; Kamps dkk, 2003). Sedangkan informasi mengenai kinetika reaksi yang terjadi pada absorpsi reaktif dan pada khususnya absorpsi reaktif gas CO₂ dapat dijumpai di berbagai literatur (Danckwartz, 1970; Xu dkk, 1992, 1993; Neumann dan Lynn, 1986; Wubs dan Beenackers, 1993, 1994; Asai dkk, 1990; Hikita dkk, 1975; Kohl dan Riesenfeld, 1985). Tujuan dari tulisan ini adalah mengkaji ulang fenomena transport yang menyertai absorpsi reaktif gas CO₂ didalam packed column.

Kajian teoritis ini dilaksanakan dengan pertama kali mengestimasi besarnya peningkatan laju absorpsi dengan adanya reaksi didalam fasa liquid (disebut enhancement factor) berdasar anggapan model perpindahan massa antarfasa yang berlaku. Terdapat beberapa model perpindahan massa yang terdapat diliteratur seperti model Film (Whitman, 1923 dalam Danckwartz, 1970), model Penetrasi (Higbie, 1935 dalam Danckwartz, 1970), model Danckwartz (Danckwartz, 1951 dalam Danckwartz, 1970), model Film-Penetration oleh Toor dan Marcello (1958) dan model Eddy diffusivity oleh King (1966). Brian dkk (1961) menggunakan model penetrasi untuk mengestimasi factor peningkatan untuk absorpsi gas disertai reaksi irreversible order dua secara numeric. Hikita dan Asai (1964) mempelajari proses absorpsi disertai reaksi irreversible umum secara analitik. Huang dan Kuo (1965) mengembangkan model matematik perpindahan massa disertai reaksi reversible. Altway (1979) menggunakan model film untuk menaksir laju absorpsi gas disertai reaksi kimia pada beberapa regim reaksi. Altway dkk (1995) mempelajari secara numeric penyelesaian model penetrasi untuk absorpsi disertai reaksi irreversible umum. Hix dan Lynn (1991) mempelajari pengaruh volatilitas reaktan terlarut terhadap peningkatan laju transfer massa dengan mengambil contoh absorpsi gas H₂S kedalam larutan SO₂ dalam

polyglycol ether. Altway (1995) menganalisa pengaruh volatilitas reaktan terlarut terhadap harga factor peningkatan absorpsi gas disertai reaksi irreversible order dua menggunakan model Penetrasi. Al-Ubaidi dkk (1990) dan Bhattacharya dkk (1997) mempelajari peningkatan laju perpindahan massa absorpsi gas disertai reaksi irreversible order dua pada kondisi non-isothermal menggunakan model film. Sedang Vas Bhat dkk (1997) dengan menggunakan model Penetrasi menganalisa proses absorpsi gas disertai reaksi reversible pada kondisi non-isothermal. Kusnaryo dkk (2007) memprediksi factor peningkatan absorpsi disertai reaksi reversible order dua pada kondisi non-isothermal menggunakan model film. Yunita dkk (2008) memprediksi factor peningkatan absorpsi disertai reaksi reversible order dua pada kondisi non-isothermal menggunakan model eddy diffusivity.

Informasi mengenai enhancement factor ini digunakan untuk mengestimasi laju absorpsi pada perhitungan desain packed column. Proses yang terjadi pada absorpsi gas disertai reaksi kimia didalam packed column cukup kompleks sehingga untuk desain dan analisa kinerja alat ini diperlukan cara-cara numerik. Danckwerts dan Gillham (1966) menyajikan prosedur desain untuk absorpsi disertai reaksi kimia didalam packed column. Paiva dan Kachan (1998) mengembangkan model dan simulasi packed column untuk absorpsi Nitrogen oksida dengan hidrogen peroksida. Altway dan Yuyun (1999) mengembangkan model dan simulasi absorpsi gas karbon dioksida kedalam larutan DEA pada packed column menggunakan gabungan metoda Kolokasi ortogonal dan Beda Hingga. Savitri dkk (2001) mengembangkan model packed column untuk absorpsi disertai reaksi irreversible order dua pada kondisi non-isothermal. Wijaya dan Altway (2007) mengembangkan model packed column untuk absorpsi gas CO₂ kedalam larutan Benfield pada kondisi non-isothermal.

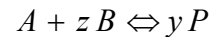
2. Kajian ulang penelitian-penelitian terkait

Kajian ulang ini dibagi menjadi dua bagian yaitu kajian mengenai enhancement factor dan kajian mengenai pemodelan packed column untuk absorpsi reaktif gas CO₂.

Enhancement factor untuk absorpsi disertai reaksi reversible order dua

Keuntungan absorpsi dengan reaksi adalah meningkatkan laju transfer massanya yang dinyatakan dengan factor peningkatan (enhancement factor). Enhancement factor diprediksi dengan mengembangkan model perpindahan antar fasa yang dalam hal penelitian

ini digunakan model film stagnan dan model eddy diffusivity atau model film teraduk. Untuk kondisi non-isothermal, terdapat dua film yaitu film transfer massa dan film transfer panas dan diasumsikan tebal kedua film ini sama ($\delta_H = \delta_M$). Reaksi yang ditinjau adalah reaksi reversible order dua berikut :



Untuk model film stagnan, persamaan yang berlaku adalah persamaan diffusi non-isothermal untuk komponen A, B, dan P dan juga persamaan energi pada film disekitar interface dan ditunjukkan pada persamaan (1) sampai dengan (4) mengikuti pendekatan yang dilakukan oleh Al-Ubaidi dkk (1990) namun dimodifikasi untuk reaksi reversible. Pada pendekatan ini pengaruh suhu terhadap koefisien diffusi dan kelarutan mengikuti hubungan yang serupa dengan persamaan Arrhenius.

$$\frac{\varepsilon_{DA}}{(1+\theta)^2} e^{\varepsilon_{DA} \left(\frac{\theta}{1+\theta} \right)} \frac{d\theta}{dX} \frac{dA}{dX} + e^{\varepsilon_{DA} \left(\frac{\theta}{1+\theta} \right)} \frac{d^2 A}{dX^2} - Me^{\varepsilon_R \left(\frac{\theta}{1+\theta} \right)}_1 \left[AB - \frac{P^2 L_R}{K} \right] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\varepsilon_{DB}}{(1+\theta)^2} e^{\varepsilon_{DB} \left(\frac{\theta}{1+\theta} \right)} \frac{d\theta}{dX} \frac{dB}{dX} + e^{\varepsilon_{DB} \left(\frac{\theta}{1+\theta} \right)} \frac{d^2 B}{dX^2} - MS_R e^{\varepsilon_R \left(\frac{\theta}{1+\theta} \right)}_1 \left[AB - \frac{P^2 L_R}{K} \right] = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\varepsilon_{DP}}{(1+\theta)^2} e^{\varepsilon_{DP} \left(\frac{\theta}{1+\theta} \right)} \frac{d\theta}{dX} \frac{dP}{dX} + e^{\varepsilon_{DP} \left(\frac{\theta}{1+\theta} \right)} \frac{d^2 P}{dX^2} + 2 MS_R T_R e^{\varepsilon_R \left(\frac{\theta}{1+\theta} \right)}_1 \left[AB - \frac{P^2 L_R}{K} \right] = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d^2 \theta}{dX^2} + \beta_R Me^{\varepsilon_R \left(\frac{\theta}{1+\theta} \right)} \left(AB - \frac{P^2 L_R}{K} \right) = 0 \quad (4)$$

Kondisi batas untuk sistim persamaan-persamaan ini dinyatakan sebagai berikut :

Pada $x = 0$ (bidang batas antara film gas dengan film liquid)

$$C_A = C_{Ai}, \quad A = \frac{C_{Ai}}{C_{Aib}} = \frac{C_{Aib}}{C_{Aib}} e^{\varepsilon_S \left(\frac{\theta}{1+\theta} \right)} = e^{\varepsilon_S \left(\frac{\theta}{1+\theta} \right)} \quad (5)$$

$$\frac{dB}{dx} = 0, \quad \frac{dP}{dx} = 0 \quad (B \text{ dan } P \text{ tidak volatile}) \quad (6)$$

$$\beta_S e^{\varepsilon_{DA} \left(\frac{\theta}{1+\theta} \right)} \frac{dA}{dx} = \frac{d\theta}{dx} \quad (7)$$

Pada $x = 1$ (bidang batas antara film liquid dengan badan liquid)

$$A = A_e, \quad B = 1, \quad P = \frac{C_{Pb}}{C_{Bb}} \quad (8)$$

$$\theta = 0 \quad (\text{karena } \delta_H = \delta_M) \quad (9)$$

Sistim persamaan diatas diselesaikan secara numerik menggunakan metoda kolokasi ortogonal untuk memperoleh profil konsentrasi A,B, dan P dan juga profil suhu didalam film. Selanjutnya E_{non} diperoleh dari persamaan (10)

$$E_{non} = \frac{D_{Ai} e^{\frac{\epsilon_{DA}}{1+\theta}} \left(\frac{\theta}{1+\theta} \right) \frac{dC_A}{dx}}{k_L C_{Aib}} \quad (10)$$

Untuk model film teraduk, mekanisme perpindahan didalam film adalah secara molekular dan turbulen yang dinyatakan dengan eddy diffusivity. Nilai eddy diffusivity makin besar (makin dominan) pada tempat didalam film yang makin jauh dari interface yang ditunjukkan dengan persamaan (11)

$$\epsilon = a \cdot x^2$$

(11)

dimana $a = 7.9 \cdot 10^{-5} \text{Re}^{1.678}$. Selanjutnya persamaan yang berlaku dapat dinyatakan dengan persamaan (12) sampai dengan persamaan (14) dan persamaan (4)

$$\frac{\epsilon_{DA}}{(\theta+1)^2} e^{\frac{\epsilon_{DA}}{1+\theta}} \frac{d\theta}{dX} \frac{dA}{dX} + e^{\frac{\epsilon_{DA}}{1+\theta}} \frac{d^2 A}{dX^2} + 2\alpha X \frac{dA}{dX} + \alpha X^2 \frac{d^2 A}{dX^2} - Me e^{\frac{\epsilon_R}{1+\theta}} \left(AB - \frac{P^2 L_R}{K} \right) = 0 \quad (12)$$

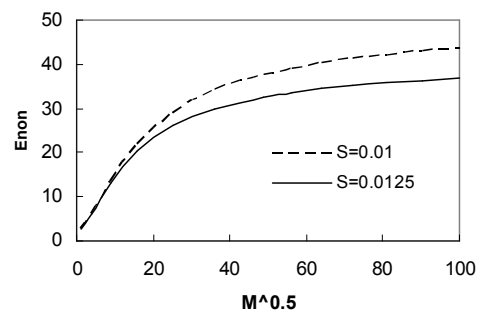
$$\frac{\epsilon_{DB}}{(\theta+1)^2} e^{\frac{\epsilon_{DB}}{1+\theta}} \frac{d\theta}{dX} \frac{dB}{dX} + e^{\frac{\epsilon_{DB}}{1+\theta}} \frac{d^2 B}{dX^2} + 2\alpha R_D X \frac{dB}{dX} + \alpha R_D X^2 \frac{d^2 B}{dX^2} - \frac{MR_D}{L} e^{\frac{\epsilon_R}{1+\theta}} \left(AB - \frac{P^2 L_R}{K} \right) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\epsilon_{DP}}{(\theta+1)^2} e^{\frac{\epsilon_{DP}}{1+\theta}} \frac{d\theta}{dX} \frac{dP}{dX} + e^{\frac{\epsilon_{DP}}{1+\theta}} \frac{d^2 P}{dX^2} + 2\alpha Q X \frac{dP}{dX} + \alpha Q X^2 \frac{d^2 P}{dX^2} + 2MQ e^{\frac{\epsilon_R}{1+\theta}} \left(AB - \frac{P^2 L_R}{K} \right) = 0 \quad (14)$$

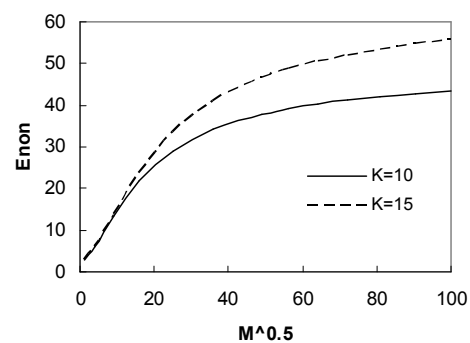
Kondisi batas untuk persamaan-persamaan differensial ini juga ditunjukkan pada persamaan (5) sampai dengan persamaan (9). Sebagaimana untuk model film stagnan, metoda kolokasi ortogonal juga digunakan untuk menyelesaikan sistim persamaan-persamaan differensial ini dan E_{non} diperoleh dari persamaan (10).

Hasil prediksi simulasi ditampilkan secara grafis pada Gambar-1 sampai dengan Gambar-4 yang menunjukkan pengaruh dari beberapa

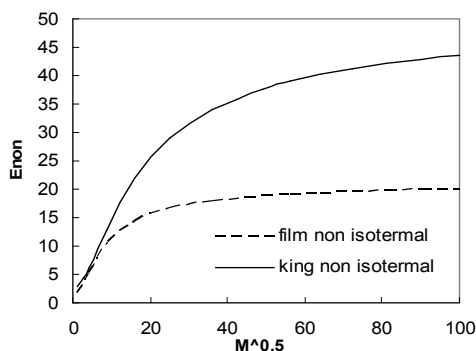
parameter model dan perbandingan hasil prediksi beberapa model. Gambar-1 menunjukkan pengaruh parameter S terhadap hasil prediksi E dengan model King. Parameter S menunjukkan rasio laju difusi A terhadap B. Kenaikan nilai parameter S akan menyebabkan penurunan nilai E. Hal ini disebabkan karena kenaikan laju difusi A akan menyebabkan pengaruh difusi makin dominan dibanding reaksi, sehingga pengaruh reaksi terhadap laju absorpsi, yaitu harga E, makin kecil. Gambar-2 menunjukkan pengaruh harga konstanta kesetimbangan terhadap harga E. Dari gambar terlihat bahwa semakin besar harga konstanta kesetimbangan (K), harga enhancement factornya juga semakin besar. Makin besar harga A berarti reaksi makin bergeser kekanan atau makin besar potensial gas A untuk bereaksi, atau dengan kata lain makin besar pengaruh reaksi terhadap peningkatan laju absorpsi atau harga E makin besar.



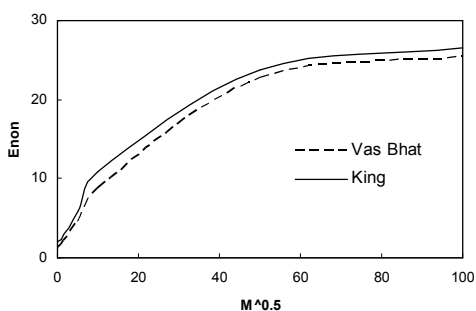
Gambar-1. Pengaruh parameter S terhadap harga Enhancement factor



Gambar-2. Pengaruh konstanta kesetimbangan K terhadap Enhancement factor



Gambar-3. Perbandingan hasil prediksi E dengan model film dan model King



Gambar-4. Perbandingan hasil prediksi E pada penelitian ini (model King) dan Vas Bhat (model Penetrasi)

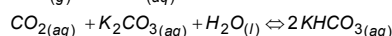
Pemakaian berbagai model perpindahan antar fasa juga dikaji pengaruhnya terhadap prediksi harga E. Gambar-3 menunjukkan perbandingan hasil prediksi E dengan menggunakan model film dan model eddy diffusivity (atau model King) dan terlihat bahwa harga E yang diprediksi dengan model King lebih besar dari pada yang diprediksi dengan model film. Hal ini wajar karena model King merupakan koreksi terhadap model Film. Dengan menggunakan model King, film tak lagi dianggap stagnan, makin jauh dari interface kondisi liquida makin teraduk, dan ini lebih sesuai dengan kenyataan. Karena film dalam kondisi teraduk, maka mekanisme perpindahan massa yang terjadi adalah diffusi turbulent atau diffusi eddy selain diffusi molekular, sehingga perkiraan laju absorpsi makin besar dan jadi nilai enhancement factor makin besar. Gambar-4 menunjukkan perbandingan hasil prediksi harga E dengan model King (pada penelitian ini) dengan model Penetrasi oleh Vas Bhat dkk (1997). Terlihat bahwa hasil prediksi harga E

dengan model King mendekati hasil prediksi dengan model Penetrasi dengan deviasi rata-rata kurang dari 5%. Perhitungan harga E dengan model Penetrasi lebih rumit dari pada model King karena melibatkan diffusi unsteady state. Sehingga dapat disimpulkan bahwa model King merupakan model yang cukup akurat namun tak terlalu rumit dalam memprediksi harga E.

Absorpsi Reaktif Gas CO₂ kedalam larutan potasium karbonat pada packed column

Penelitian dilakukan secara eksperimen dan simulasi. Penelitian eksperimen dilaksanakan untuk validasi hasil prediksi simulasi. Kolom yang digunakan adalah berdiameter 10 cm, dan diisi packing Raschig ring 1cm setinggi 1.75 m. Campuran CO₂ dan udara dialirkan dari bawah dan dikontakkan dengan aliran larutan 1.5 M K₂CO₃ yang mengalir dari atas. Terjadi penyerapan CO₂ disertai reaksi didalam larutan. Cairan keluar dianalisa untuk menentukan kadar K₂CO₃ sisa dan KHCO₃ dengan cara titrasi. Aliran gas masuk terdiri dari CO₂ dengan laju 10 liter/menit, dan udara dengan laju 42 liter/menit. Laju alir larutan K₂CO₃ divariasi 3, 4, 5, 6, dan 7 liter/menit.

Untuk penelitian simulasi, diperlukan informasi mengenai kinetika dan kesetimbangan reaksi, kelarutan gas dalam larutan elektrolit, dan data perpindahan massa. Pada proses absorpsi ini terjadi reaksi stoichiometri sebagai berikut :



Reaksi yang menentukan kecepatan reaksi adalah:



Didalam larutan juga terjadi reaksi-reaksi kesetimbangan berikut :



Konstanta kesetimbangan untuk reaksi (17) dan (18) pada suhu 20°C berturut-turut adalah $K_1 = 4.16 \times 10^{-7}$ gion/liter dan $K_2 = 4.2 \times 10^{-11}$ g ion/liter. Konsentrasi ion OH⁻ didalam larutan dapat diperoleh sebagai berikut,

$$[\text{OH}^-] = \frac{K_w [\text{CO}_3^{2-}]}{K_2 [\text{HCO}_3^-]} \quad (19)$$

Dimana K_w adalah konstanta air yang nilainya pada suhu 20°C adalah 0.68×10^{-14} (g ion/liter)². Reaksi yang menentukan kecepatan reaksi adalah reaksi yang ditunjukkan pada

persamaan (16) dan dapat dibuktikan bahwa konstanta kesetimbangan untuk reaksi ini adalah $K=K_1/K_W$. Sehingga laju reaksi netto untuk reaksi ini ditunjukkan berikut ini :

$$r = k_{OH} \left\{ [CO_2][OH^-] - \frac{K_W[HCO_3^-]}{K_1} \right\} \quad (20)$$

Dari persamaan (19) dan (20) diperoleh,

$$r = \frac{k_{OH}K_W}{K_2[HCO_3^-]} \left\{ [CO_2][CO_3^{2-}] - \frac{K_2[HCO_3^-]^2}{K_1} \right\} \quad (21)$$

Laju absorpsi gas disertai reaksi kimia pada umumnya diperoleh dengan memperhitungkan pengaruh reaksi menggunakan faktor peningkatan, E yaitu :

$$R = E k_L (C_{Ai} - C_{Ab}) \quad (22)$$

Dimana C_{Ai} adalah konsentrasi gas dalam fasa liquid pada interface yang dianggap terjadi kesetimbangan gas-liquid. C_{Ai} diestimasi dengan menggunakan hukum Henry yang dimodifikasi akibat adanya ion-ion elektrolit dalam larutan (Danckwertz, 1970). Sedang k_L adalah koefisien transfer massa sisi liquid. Harga E diestimasi dengan menggunakan model King yang diuraikan sebelumnya. Bila tahanan sisi gas tidak signifikan, maka tekanan parsial gas A pada interface P_{Ai} sama dengan tekanan parsial gas A didalam badan gas P_A , namun bila tahanan sisi gas tak dapat diabaikan, maka P_{Ai} diperoleh dari P_A dari persamaan berikut,

$$\bar{R}a = k_G a (P_A - P_{Ai}) \quad (23)$$

Pemodelan absorpsi disertai reaksi kimia didalam packed column pada kondisi non-isothermal dapat dikembangkan dengan membuat neraca bahan komponen A (CO_2), B (K_2CO_3), dan P ($KHCO_3$) sistim liquid, neraca bahan komponen A(CO_2) dalam fasa gas, serta neraca energi untuk fasa gas dan liquid masing-masing pada elemen kolom setebal dz dimana model kinetika reaksi yang digunakan adalah ditunjukkan pada persamaan (21) dengan parameter-parameternya diperoleh dari Danckwertz (1970).

$$\frac{dx_{Ab}}{d\xi} = \left(E_{non} NT (x_{Ai} - x_{Ab}) - \varepsilon_L \psi \left(x_{Ab} x_{Bb} - \frac{x_{Pb}}{K} \right) \right) \quad (24)$$

$$\frac{dx_{Bb}}{d\xi} = \left(-\varepsilon_L \psi \left(x_{Ab} x_{Bb} - \frac{x_{Pb}}{K} \right) \right) \quad (25)$$

$$\frac{dx_{Pb}}{d\xi} = \left(\varepsilon_L \psi \left(x_{Ab} x_{Bb} - \frac{x_{Pb}}{K} \right) \right) \quad (26)$$

$$\frac{dy_{Ab}}{d\xi} = \gamma NT R (y_{Ab} - y_{Ai}) \quad (27)$$

$$\frac{dT_L}{d\xi} = - \left(\sigma_L (T_G - T_L) + \psi \varepsilon_L \omega \left(x_{Ab} x_{Bb} - \frac{x_{Pb}}{K} \right) \right) \quad (28)$$

$$\frac{dT_G}{d\xi} = \sigma_G (T_G - T_L) \quad (29)$$

dimana,

$$\sigma_G = \frac{h a_v \lambda}{(G/S) C_{PG}} \quad (30)$$

$$\xi = \frac{z}{\lambda}; dz = \lambda d\xi \quad (31)$$

$$\sigma_L = \frac{h a_v \lambda}{(L/S) C_{PL}}; R = \frac{L}{G}; \psi = \frac{k_2 C^2 \lambda}{(L/S)}; \quad (32)$$

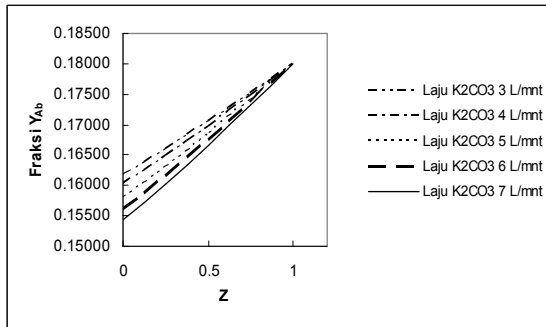
$$NT = \frac{k_s a_s \lambda}{(L/S)}; \omega = \frac{\Delta H_R}{C_{PL}}$$

Sistim persamaan differensial (24) sampai dengan (29) diselesaikan secara numerik menggunakan metoda Runge Kutta order empat untuk mendapatkan profil konsentrasi A,B, dan P dalam fasa liquid, profil mole fraksi A dalam fasa gas, serta profil suhu gas dan liquid didalam kolom. Dari hasil prediksi ini maka persen recovery CO_2 diperoleh dari persamaan (33) :

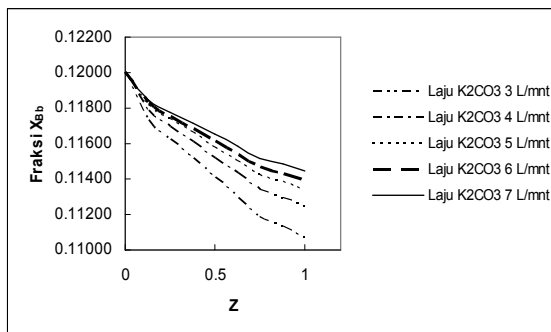
$$\% Rec = \frac{y_{Ain} - y_{Aout}}{y_{Ain}} \times 100\% \quad (33)$$

Hasil prediksi simulasi dari penelitian ini ditunjukkan pada Gambar-5 sampai dengan Gambar-7 yang berturut-turut memperlihatkan profil mole fraksi CO_2 dalam fasa gas, serta profil mole fraksi K_2CO_3 dan $KHCO_3$ dalam fasa cair. Gambar gambar ini menunjukkan bahwa menaikkan laju alir absorben dari 3 sampai 7 liter/menit masih meningkatkan kinerja kolom untuk menyerap gas CO_2 . Hasil prediksi simulasi juga dinyatakan sebagai pengaruh laju alir larutan K_2CO_3 dan konsentrasi K_2CO_3 terhadap persen recovery CO_2 yang ditunjukkan pada Gambar-8 dan Gambar-9. Pada Gambar-5, parameter R menyatakan rasio molar laju alir gas terhadap laju alir liquid. Nilai R yang lebih kecil menunjukkan laju alir absorben yang lebih besar. Terlihat bahwa, menaikkan laju alir absorben sebesar dua kalinya dapat menaikkan % recovery CO_2 sebesar sekitar 35% nya. Menaikkan laju alir absorben dapat menaikkan koefisien transfer massa sisi liquid atau menurunkan tahanan transfer massa sisi liquid akibat kenaikan turbulensi aliran liquid. Menaikkan laju alir absorben juga akan menurunkan konsentrasi CO_2 dalam badan liquid dan akibatnya akan memperbesar driving force untuk transfer massa. Kedua dampak ini akan memperbesar laju

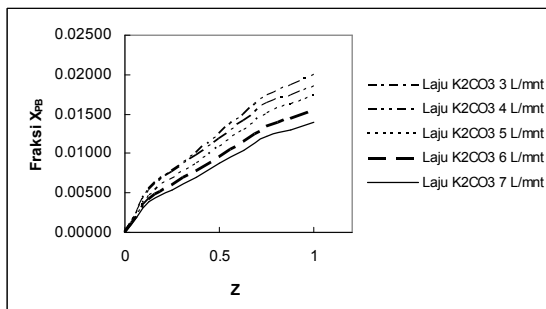
transfer massa atau laju absorpsi gas CO_2 kedalam liquid.



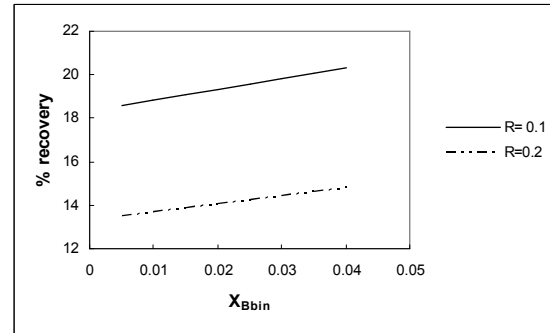
Gambar-5, Profil mole fraksi CO_2 dalam fasa gas pada packed column



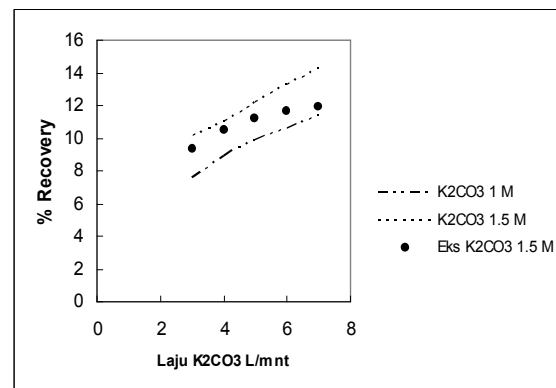
Gambar-6, Profil mole fraksi K_2CO_3 dalam fasa cair pada packed column



Gambar-7, Profil mole fraksi KHCO_3 dalam fasa cair pada packed column



Gambar-8. Pengaruh X_{Bin} dan R terhadap % recovery



Gambar-9. Perbandingan hasil prediksi simulasi dan data eksperimen

Hasil prediksi simulasi pada penelitian ini dibandingkan dengan data eksperimen yang ditunjukkan pada Gambar-9. Terlihat bahwa hasil prediksi cukup dekat dengan data eksperimen untuk laju alir absorben yang kecil. Namun untuk laju alir absorben yang makin besar, deviasi antara hasil prediksi simulasi dan data eksperimen makin besar. Data eksperimen menunjukkan bahwa menaikkan laju alir absorben dari 3 sampai 6 liter/menit akan menyebabkan persen recovery CO_2 yang makin besar namun kenaikan laju alir lebih dari 6 liter/menit tak menyebabkan kenaikan persen recovery CO_2 yang berarti. Tak demikian halnya dengan hasil prediksi simulasi, kenaikan laju alir absorben dari 3 sampai dengan 7 liter/menit menyebabkan kenaikan persen recovery CO_2 yang cukup berarti. Deviasi antara hasil prediksi dan data eksperimen lebih kecil dari 10% untuk laju alir absorben dibawah 5 liter/menit, sedang untuk laju alir absorben antara 5 sampai dengan 7 liter/menit deviasi nya antara 10-30%. Salah satu penyebab deviasi ini disebabkan karena dalam simulasi ini belum diperhitungkan perubahan pola alir cairan didalam kolom dengan perubahan laju alir absorben.

3. Bentuk-bentuk hasil penelitian

Hasil-hasil penelitian ini dapat dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu mengenai simulasi enhancement factor dan mengenai simulasi packed column absorber. Untuk bagian pertama, hasil penelitian berupa aplikasi model eddy diffusivity atau model King untuk estimasi enhancement factor absorpsi disertai reaksi kimia reversible order dua pada kondisi non-isothermal. Hasil prediksi harga E dengan model ini ternyata sangat mendekati dengan hasil prediksi menggunakan model penetrasi yang lebih rumit. Beberapa peneliti (Glasscock, 1990; Bishnoi, 2000; Cullinane, 2005) telah mengaplikasikan model ini untuk fenomena transfer massa antarfase nya namun dengan asumsi film isothermal. Penentuan secara teoritis harga E ini penting dalam mendesain dan mensimulasi kinerja kolom absorber untuk menaksir laju perpindahan massa yang terjadi.

Untuk bagian kedua, hasil penelitian berupa pemodelan packed column untuk absorpsi gas CO₂ kedalam larutan K₂CO₃ pada kondisi non-isothermal dimana harga E yang dibutuhkan untuk estimasi laju absorpsi nya ditentukan dengan model King dengan memperhitungkan pengaruh panas reaksi dan pelarutan (film non-isothermal). Peneliti sebelumnya (Linek and Václav, 1990; Sanyal dkk, 1988) telah mengkaji pemodelan packed column untuk absorpsi reaktif gas CO₂ pada kondisi isothermal dan non-isothermal namun dengan asumsi film isothermal.

4. Peluang-peluang baru

Terdapat beberapa peluang untuk penelitian lanjutan dari penelitian yang telah dilakukan antara lain diuraikan berikut ini.

Salah satu asumsi pemodelan packed column untuk penelitian yang telah dilakukan adalah aliran fasa gas dan cair didalam kolom adalah plug flow. Perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengkaji bagaimana pengaruh ketidak idealan aliran gas dan liquid didalam packed column terhadap kinerja kolom dalam mengabsorpsi gas CO₂ dengan larutan K₂CO₃.

Selain itu perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai pemodelan absorpsi multi komponen dengan reaksi didalam packed column karena pada aplikasi didalam industri (misal industri petrokimia) gas yang masuk (gas sintesa) terdiri dari CO₂, N₂, CO, CH₄, dan Argon dan tekanan operasi kolom besar (kurang lebih 30 bar) sehingga gas yang terserap bukan CO₂ saja dan perlu diperhitungkan penyerapan gas-gas yang lain. Altway dkk (2005) telah mengembangkan model simulasi kolom komersial untuk penyerapan gas CO₂ dari gas sintesa dengan memperhitungkan terlarutnya

gas-gas selain CO₂ namun dengan asumsi kondisi isothermal.

Ucapan Terima kasih

Kami ucapkan terima kasih pada mahasiswa-mahasiswa kami, Penti Andhini, Yuli Astuti, Yuyun, L.W., Mohamad Effendi, Mohamad Ikhlas, Yuniartania Savitri, Erly Sepfitri, Yunita D. Indrasari, Koatlely A. Serpara, dan Radya Purna Wijaya atas kontribusinya pada penelitian ini. Demikian pula ucapan terima kasih kami ucapkan pada jurusan teknik kimia atas fasilitas yang diberikan pada penelitian ini.

Daftar Notasi

a	Konstanta pada persamaan	
a _v	Luas permukaan interface per satuan volum	m ² /m ³
A	Konsentrasi A tak berdimensi pada film, A=C _A /C _{Aib}	
BM	Berat molekul	kg/kgmol
C _i	Konsentrasi komponen i dalam larutan	kmol/m ³
C _{Aib}	Konsentrasi spesies A di interface pada temperatur Bulk	kmol/m ³
C _{Bb}	Konsentrasi spesies B di badan liquid	kmol/m ³
C _{Pb}	Konsentrasi spesies P di badan liquid	kmol/m ³
C _{PG}	Kapasitas panas fase gas	J/kmol K
C _{PL}	Kapasitas panas fase liquid	J/kmol K
D _A	Koefisien difusivitas spesies A	m ² /s
D _B	Koefisien difusivitas spesies B	m ² /s
D _P	Koefisien difusivitas spesies P	m ² /s
E	Faktor Enhancement	
E _{non}	Faktor Enhancement non isothermal	
G	Laju Molar gas	kmol/s
G _m	Laju Molar gas per satuan luas	kmol/m ² .s
h	Koefisien transfer panas	J/m ² .K.s
He	Konstanta Henry	Pa
ΔH _R	Panas reaksi	J/kmol
ΔH _S	Panas pelarutan	J/kmol
K	Konstanta Kesetimbangan	

K_1	Konstanta	Kmol/m^3	panas pelarutan
K_2	kesetimbangan		$(-\Delta H_S)D_A C_{Aib}/KT_b$
K_W	Konstanta air	$(\text{kmol/m}^3)^2$	γ Didefinisikan $\gamma=k_y/k_x$
k_2	Konstanta reaksi orde 2	$\text{m}^3/\text{kmol.s}$	δ_M, δ_H Ketebalan film untuk perpindahan massa dan panas
k_G	Koefisien perpindahan massa fasa gas	$\text{kmol/m}^2\text{Pa.s}$	ϵ_L Hold up liquid m
k_L	Koefisien perpindahan massa fasa liquid	m/s	ϵ_D Energi aktivasi tak berdimensi untuk difusi
k_x	Koefisien perpindahan massa fasa liquid	$\text{kmol/m}^2.\text{s}$	E_D/RT_b
k_y	Koefisien perpindahan massa fasa gas	$\text{kmol/m}^2.\text{s}$	ϵ_R Energi aktivasi tak berdimensi untuk reaksi fase liquid E_R/RT_b
L	Laju molar fase liquid	kmol/s	ϵ_S Energi aktivasi pelarutan tak berdimensi $< E_S/RT_b$
L_R	Didefinisikan $L_R = C_{Bb}/C_{Aib}$		ϕ_L Hold up liquid m^3/m^3
M	Bilangan Hatta		λ Tinggi kolom m
N	Jumlah titik kolokasi		ξ Bentuk tak berdimensi dari jarak
NT	Tinggi packed column tak berdimensi		ω Didefinisikan $\omega=\Delta H_R/C_{PL}$ K
P	Konsentrasi P tak berdimensi pada film, $P = C_P/C_{Bb}$		σ_G Didefinisikan $\sigma_G=h a_v \lambda S/(G C_{PG})$
Pt	Tekanan	Pa	σ_L Didefinisikan $\sigma_L=h a_v \lambda S/(L C_{PL})$
Q	Didefinisikan $Q=D_{Ai}/D_{Pi}$		θ Bentuk tak berdimensi dari Temperatur, $\theta = (T-T_b)/T_b$
Ra	Laju Aborsi	$\text{kmol/m}^3.\text{s}$	ψ Bilangan tak berdimensi, $\psi=k_2 C^2 \lambda/(L/S)$
r	Laju reaksi komponen	$\text{kmol/m}^3.\text{s}$	
R	Perbandingan laju molar liquid terhadap laju molar Gas		
R_D	Didefinisikan $R_D=D_{Ai}/D_{Bi}$		
S	Luas Permukaan kolom	m^2	
S_R	Didefinisikan $S_R=D_B C_{Bb} / (D_A C_{Aib})$		
T_b	Temperatur bulk	K	
T_L	Temperatur liquid	K	
T_G	Temperatur gas	K	
T_R	Didefinisikan $T_R = D_P/D_A$		
x_{Ab}	Fraksi mol spesies A di badan liquid		
x_{Bb}	Fraksi mol spesies B di badan liquid		
x_{Pb}	Fraksi mol spesies P di badan liquid		
z	Jarak aksial	m	
Z	Jarak aksial tak berdimensi, $Z=z/\lambda$		
Huruf latin			
α	Didefinisikan $\alpha = a D_{Ai}/k_L^2$		
β_R	Bentuk tak berdimensi dari panas reaksi $(-\Delta H_R)D_A C_{Aib}/KT_b$		
β_s	Bentuk tak berdimensi dari		

Daftar pustaka

- [1] Al-Ubaidi, B.S, M.S. Salim, and A.A. Shaikh (1990), "Non Isothermal Gas Absorption Accompanied by a Second Order Irreversible Reaction", *AIChE J.*, 36, 141-146
- [2] Altway, A. (1979), "Analysis of Two-Phases Counter Current Plug-Flow Reactor", *MS Thesis*, University of Wisconsin, Madison
- [3] Altway, A. (1995), "Pengaruh Volatilitas Reaktan Terlarut Terhadap Harga Faktor Peningkatan Absorpsi Disertai Reaksi Kimia Irreversible Umum", *IPTEK*, Vol.6, No. 2, hal. 130-137.
- [4] Altway, A., Yuyun, L.W. (1999), "Simulation of Carbon Dioxide Absorption into Diethanolamine Solution in Packed Column Using Combination of Orthogonal Collocation and Finite Difference Method", *Proceeding ITB*, Vol.31, No.2
- [5] Altway, A., Suwarno, N., Andhini, P. dan Astuti, Y. (1995), "Penyelesaian Numerik Model Penetrasi untuk Absorpsi Gas disertai Reaksi Kimia Irreversible Umum", *IPTEK*, Vol.6, No.2.

- [6] Altway, A., Suwarno, N., Winardi, S., Susianto, Kuswandi, Kusnaryo, Setiawan, H. (2005), "Simulasi unit CO₂ Removal PT. PKT 2", *Technical Report*, ITS-PKT
- [7] Asai, S., Y. Konishi and T. Yabu, (1990), "Kinetics of Absorption of H₂S into Aqueous Ferric Sulfate Solutions", *AIChE J.*, 36, hal. 1331-1338.
- [8] Astarita, G. (1963), "Absorption of Carbon Dioxide into Alkaline Solutions in Packed Tower", *I&EC Fundamentals*, Vol. 2, No. 4.
- [9] Astarita, G. (1967), "Mass Transfer with Chemical Reaction", Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
- [10] Astarita, G., D.W. Savage, and J.M. Longo, (1981), "Promotion of CO₂ Mass Transfer in Carbonate Solutions", *Chem. Eng. Sci.*, 36, hal. 581-588.
- [11] Bhattacharya, A., R.V. Gholap and R.V. Chaudhari (1997), "Gas Absorption with Exothermic Bimolecular (1,1 Order) Reaction", *AIChE J.*, 33, hal. 1507-1513.
- [12] Bishnoi, S. and G.T. Rochelle (2000), "Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Piperazine: Reaction Kinetics, Mass Transfer and Solubility", *Chem. Eng. Sci.*, 55(22), hal. 5531-5543.
- [13] Brian, P.L.T., J.F. Hurley and E.H. Hasseltine (1961), "Penetration Theory for Gas Absorption Accompanied by a Second Order Chemical Reaction", *AIChE J.*, vol. 7, hal. 226.
- [14] Cullinane, J.T. (2005), "Thermodynamics and Kinetics of Aqueous Piperazine with Potassium Carbonate for Carbon Dioxide Absorption", *Ph.D. Dissertation*, The University of Texas at Austin.
- [15] Danckwerts, P.V. and A.J. Gillham, (1966), "The Design of Gas Absorbers I: Method for Predicting Rates of Absorption with Chemical Reaction in Packed Columns and Tests with 1 ½ in Raschig Rings", *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, 44, hal. T42-T54
- [16] Danckwerts (1970), "*Gas Liquid Reaction*", McGraw Hill Book Company.
- [17] Effendi, M dan M. Ikhlās (2001), "Simulasi Absorpsi Gas Disertai Reaksi Kimia Irreversible Order Dua Pada Kondisi NonIsothermal", *Skripsi*, Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, Jurusan Teknik Kimia, FTI, ITS.
- [18] Glasscock, D. and G.T. Rochelle (1989), "Numerical Simulation of Theories for Gas Absorption with Chemical Reaction", *AIChE J.*, 35(8), hal. 1271-1281.
- [19] Glasscock, D.A. and G.T. Rochelle (1993), "Approximate Simulation of CO₂ and H₂S Absorption into Aqueous Alkanolamine", *AIChE Journal*, Vol. 39, No. 8.
- [20] Hikita, H. and S. Asai (1964), "Gas Absorption with (m,n)-th Order Irreversible Chemical Reaction", *Int. Chem. Eng.*, 4, hal. 332.
- [21] Hikita, H., S. Asai, H. Ishikawa and Y. Saito (1975), "Kinetics of Absorption of Chlorine in Aqueous Acidic Solutions of Ferrous Chloride", *Chem. Eng. Sci.*, 30, hal. 607-616
- [22] Hix, R.M. and S. Lynn, (1991), "Reactive Absorption of H₂S by a Solution of SO₂ in Poly Glycol Ether: The Effect of Volatile Dissolved Reactant on Mass Transfer Enhancement", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 30, hal. 930-939.
- [23] Huang, C.J dan Kuo, C.H. (1965), "Mathematical Models for Mass Transfer Accompanied Reversible Chemical Reaction.", *AIChE Journal*, Vol. 11, hal. 901-910.
- [24] Joosten, G.E.H. and P.V. Danckwerts, (1972), "Solubility and Diffusivity of Nitrous Oxide in Equimolar Potassium Carbonate-Potassium Bicarbonate Solution at 25°C and 1 atm", *J. Chem. Data*, Vol. 17, No. 4, hal. 452-454.
- [25] Kamps, A.P., S.J. Xia, and G. Maurer, (2003), "Solubility of CO₂ in (H₂O+Piperazine) and in (H₂O+MDEA+Piperazine)", *AIChE J.*, Vol. 49, No. 10, hal. 2662-2670.
- [26] King, C.J., (1966), "Turbulent Liquid-Phase Mass Transfer at a Free Gas-Liquid Interface", *Ind. Eng. Chem. Fund.*, Vol. 5, No. 1, hal. 1-8.
- [27] Kohl, A.L. and F.C. Riesenfeld (1985), "*Gas Purification*", Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- [28] Kusnaryo, Kuswandi, Susianto, A. Altway, (2007), "Enhancement Factor Simulation of Gas Absorption with Second Order Reversible Chemical Reaction at Non-isothermal Condition", 14th Regional Symposium on Chemical Engineering, Yogyakarta
- [29] Linek and Vaclav (1990), "Verification of The Design Methods for Industrial Carbon Dioxide-Triethanolamine Absorbers: Laboratory Differential

-
- Simulation and Computational Methods”, *Ind.Eng.Res.*, Vol.29, No.9.
- [30] Little, R.J., G.F. Versteeg and W.P.M. Van Swaaij,(1992)” Solubility and Diffusivity data for the Absorption of COS, CO₂ and N₂O in Amine Solution”, *J. Chem. Data*, Vol.37, 49-55, 1992
- [31] Wubs, H.J. and Beenackers, A.A.C.M.,”Kinetics of the Oxidation of Ferrous Chelates of EDTA and HEDTA into Aqueous Solutions, *IND. Eng. Chem. Res.* , Vol. 32, pp.2580-2594 (1993)
- [32] Wubs, H.J. and Beenackers, A.A.C.M.,”Kinetics of the Oxidation of Ferrous Chelates of EDTA and HEDTA into Aqueous Solutions, *IND. Eng. Chem. Res.* , Vol. 40, No.3, pp.433-444 (1994)
- [33] Xu, G.W., Cheng-Fang Zhang, Shu-Jun Qin, and Yi-Wei Wang (1992),” Kinetics Study on Absorption of Carbon Dioxide into Solution of Activated Methyldiethanolamine’, *Ind.Eng.Chem.* , Vol 31, 921-927.
- [34] Xu, S., Yi-Wei Wang, F.D.Otto and A.E. Mather (1993), ” Kinetics of the Reaction of Carbon Dioxide With Aqueous 2-Piperidineethanol Solutions”, *AIChI Journal*, Vol.39, No.10.
- [35] Yunita D. Indrasari, Koatlery A. Serpara, Ali Altway, Susianto (2008),” Simulasi Enhancement Factor untuk Absorpsi Gas disertai Reaksi Kimia Reversible Order Dua Kondisi Non-Isothermal dengan Model Difusifitas Eddy”, Seminar Nasional “Kejuangan” UPN Yogyakarta.