

KAJIAN TEORITIS PEMISAHAN H₂S DALAM BIOGAS SECARA ABSORBSI REAKTIF KE DALAM LARUTAN Fe-EDTA MENGGUNAKAN *PACKED COLUMN*

THEORETICAL STUDY OF H₂S SEPARATION FROM BIOGAS BY REACTIVE ABSORPTION INTO Fe-EDTA SOLUTION IN *PACKED COLUMN*

Ali Altway*, Nonot Suwarno, Susianto, Waleed Nour Eldien, Zaki, Indra Wenda
Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa
Jurusan Teknik Kimia, FTI-ITS
*e-mail: alimohad@chem-eng.its.ac.id

Abstract

The presence of H₂S in biogas gives dangerous effect on environment; Therefore, H₂S must be eliminated from the biogas. The purpose of this research is to analyze theoretically the elimination process by reactive absorption of H₂S in biogas into aqueous Fe-EDTA solution in packed column. This research was carried out by developing mathematical model of the process. The interfacial mass transfer phenomena were described by film model equations solved using van Krevelen approximation. Steady state, isothermal condition, and plug-like pattern of gas-liquid flow in packed column were assumed in this study. The model consists of differential mass balance of H₂S in gas phase and Fe-EDTA in liquid phase arising system of non-linear first order differential equations solved numerically by Fourth order Runge-Kutta method under Matlab facility. The system studied consists of a column 10 cm in diameter filled with 1cm raschig rings to the height of 100 cm. The gas flow rate was held constant at $G_v = 100$ mL/s, liquid flow rate L' was varied 20, 30, and 40 mL/s, pressure P was varied from 1 to 2.5 atm, the concentration of Fe-EDTA in inlet absorbent was varied from 0.02 to 0.06 kmol/m³. The experimental work was also carried out to validate the simulation prediction. The simulation results showed that the percentage of absorbed H₂S can be enhanced by decreasing pressure, increasing temperature, liquid flow rate, and Fe-EDTA concentration. The trend of pressure and temperature effect on % H₂S recovery showed that the absorption process is controlled by the gas resistance. Using column with packing height of 1 meter, gas flow rate of 100 mL/s, using absorbent containing 0.06 kmol/m³ Fe-EDTA with flow rate of 20 mL/s, and at ambient pressure and temperature, the percentage recovery of H₂S reached the value of above 99%. The simulation results agree very well with the experimental data within 3% error.

Keywords: biogas purification, H₂S removal, Fe/EDTA catalyst, film model

1. PENDAHULUAN

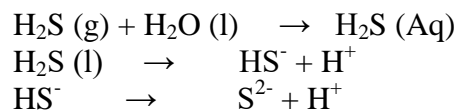
Proses anaerobik sering digunakan untuk mengolah limbah cair dan limbah padat. Proses ini merupakan penguraian senyawa organik tanpa adanya oksigen. Hasil produk samping dari proses adalah biogas yang pada umumnya mengandung 40-70% CH₄, 30-60% CO₂, 0-1% H₂ dan 0-3% H₂S (Soewarno *et al.*, 1991). Emisi biogas ini dapat merusak lingkungan karena kandungan gas H₂S yang membahayakan manusia dan binatang. Pada

konsentrasi yang rendah, gas ini memiliki bau yang tidak sedap, dan pada konsentrasi yang tinggi akan membahayakan jiwa seseorang. Nilai ambang batas konsentrasi H₂S di udara ambient adalah 8 sampai 10 ppm. Namun, biogas adalah sumber energi yang menarik karena kandungan metannya yang tinggi. Pemakaian langsung biogas sebagai bahan bakar tanpa penghilangan H₂S akan menyebabkan pembentukan *sulphur dioxide* yang merupakan polutan yang beracun dan menyebabkan hujan asam di atmosfer. Selain

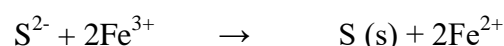
itu, biogas juga mengandung karbon dioksida. Gas ini tidak terlalu berbahaya bagi manusia dan binatang. Namun kandungan gas ini dalam biogas akan mengurangi nilai kalor biogas. Selain itu gas ini juga memberikan kontribusi terhadap pemanasan global oleh efek rumah kaca. Gas ini juga harus dihilangkan dari biogas.

Terdapat beberapa proses di literatur untuk menghilangkan gas H₂S (Horikawa, 2001; Davidson *et al.*, 1995; Kohl dan Riesenfeld, 1985) yang dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu absorpsi reaktif dan adsorpsi. Absorpsi reaktif adalah absorpsi disertai reaksi kimia, di mana gas yang terserap bereaksi dengan reaktan yang ada di dalam fasa liquid. Sedangkan adsorpsi adalah proses penyerapan pada permukaan partikel padat yang disebut adsorben. Dalam hal penerapan gas H₂S, adsorben yang umum digunakan adalah ZnO. Pada penggunaan adsorben ini H₂S bereaksi menjadi ZnS. Sebagian besar proses ini hanya menghilangkan H₂S dari gas tapi tak merubahnya menjadi produk yang lebih stabil dan bermanfaat. Beberapa peneliti telah mempelajari proses penghilangan gas H₂S di dalam aliran gas dengan merubahnya menjadi belerang yang lebih stabil (Horikawa *et al.*, 2004; Demmink dan Beenackers, 1998; Asai *et al.*, 1997; Broekhuis *et al.*, 1992; Kikuchi *et al.*, 1991; Hix dan Lynn, 1991; Asai *et al.*, 1990). Demmink dan Beenackers (1998) mengusulkan proses desulfurisasi gas dengan larutan Ferric Chelate dari pada EDTA dan HEDTA. Asai *et al.* (1997, 1990) dan Broekhuis *et al.* (1992) mengusulkan proses perubahan H₂S menjadi belerang dengan mereaksikannya dengan garam-garam besi *Ferric*. Sedang Hix dan Lynn (1991) mengusulkan proses penyerapan gas H₂S ke dalam larutan SO₂ dalam *polyglycol ether* yang juga menghasilkan elemental belerang. Horikawa *et al.* (2004) mengusulkan proses penghilangan gas H₂S dari biogas dengan merubahnya menjadi belerang (S) menggunakan proses penyerapan ke dalam larutan chelate besi dari pada EDTA. Pada penyerapan H₂S

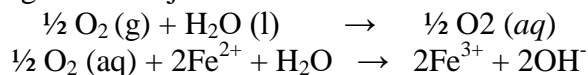
dalam biogas menggunakan larutan absorben Fe-EDTA ini, proses diawali dengan absorpsi H₂S oleh air dan reaksi disosiasi dalam air. Proses tersebut dapat dituliskan sebagai berikut (O'Brien, 1991 dalam Horikawa *et al.*, 2004):



Selanjutnya ion sulfur (S²⁻) bereaksi dengan ion feri (Fe³⁺) yang ada di dalam larutan, mengikuti reaksi sebagai berikut:



Sulfur hasil reaksi ini adalah sulfur padat yang berada di dalam sistem larutan absorben. Selanjutnya sulfur padat tersebut dipisahkan secara filtrasi. Filtrat dari hasil filtrasi diregenerasi menggunakan udara. Pada saat regenerasi terjadi reaksi-reaksi berikut :



Larutan yang telah diregenerasi mengandung ion ferri selanjutnya digunakan kembali untuk menyerap H₂S. Secara keseluruhan proses absorpsi dan regenerasi dapat dituliskan sebagai berikut :



Kajian teoritis mengenai proses absorpsi gas H₂S ke dalam larutan besi chelate EDTA atau HEDTA ataupun ke dalam larutan garam Fe(III) pada *packed column* belum pernah dilakukan. Kajian teoritis ini penting untuk desain dan analisis kinerja kolom. Peneliti terdahulu telah banyak melakukan kajian teoritis dan eksperimental mengenai sistem absorpsi reaktif yang lain seperti Astarita (1963), Glasscock dan Rochelle (1993), Linek dan Vaclav (1990), Qian *et al.* (1995), Sanyal *et al.* (1988), dan Xu *et al.* (1992). Danckwerts dan Gillham (1966) menyajikan prosedur desain untuk absorpsi disertai reaksi kimia di dalam *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 ke dalam larutan DEA pada *packed column* menggunakan gabungan metoda Kolokasi Ortogonal dan Beda Hingga. Savitri *et al.* (2001) mengembangkan model *packed column* untuk absorpsi disertai reaksi *irreversible* order dua pada kondisi non-isotermal. Wijaya dan Altway (2007) mengembangkan model *packed column* untuk absorpsi gas CO₂ ke dalam larutan Benfield pada kondisi non-isotermal.

Kajian teoritis absorpsi reaktif di dalam *packed column* memerlukan estimasi peningkatan laju absorpsi dengan adanya reaksi di dalam fasa *liquid (enhancement factor)* berdasar anggapan model perpindahan massa antar fasa yang berlaku. Terdapat beberapa model perpindahan massa yang terdapat di literatur seperti model Film (Whitman, 1923 dalam Danckwerts, 1970), model Penetrasi (Higbie, 1935, dalam Danckwerts, 1970), model Danckwerts (1951) dalam Danckwerts (1970), model *Film-Penetration* oleh Toor dan Marcello (1958) dan model *Eddy diffusivity* oleh King (1966). Brian *et al.* (1961) menggunakan model penetrasi untuk mengestimasi faktor peningkatan untuk absorpsi gas disertai reaksi *irreversible* order dua secara numerik. Penelitian Huang dan Kuo (1965) mempelajari perpindahan massa dengan reaksi *reversible* dengan teori penetrasi film. Hikita dan Asai (1964) mempelajari proses absorpsi disertai reaksi *irreversible* umum secara analitik. Altway *et al.* (1995) mempelajari secara numerik 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 ke dalam larutan SO₂ dalam *polyglycol ether*. Altway (1995) menganalisis pengaruh volatilitas reaktan terlarut terhadap harga faktor peningkatan absorpsi gas

disertai reaksi *irreversible* order dua menggunakan model Penetrasi. Al-Ubaidi *et al.* (1990) dan Bhattacharya *et al.* (1997) mempelajari peningkatan laju perpindahan massa absorpsi gas disertai reaksi *irreversible* order dua pada kondisi non-isotermal menggunakan model film. Sedang Vas Bhat *et al.* (1997) dengan menggunakan model penetrasi menganalisis proses absorpsi gas disertai reaksi *reversible* pada kondisi non-isotermal. Effendi dan Ikhlas (2001) menggunakan model film untuk memprediksi faktor peningkatan absorpsi disertai reaksi *irreversible* order dua pada kondisi non-isotermal. Yunita *et al.* (2008) memprediksi faktor peningkatan absorpsi disertai reaksi *reversible* order dua pada kondisi non-isotermal menggunakan model *Eddy Diffusivity*.

Salah satu informasi penting yang dibutuhkan untuk mengestimasi faktor peningkatan (*enhancement factor*) yang diuraikan sebelumnya adalah data kinetik. Banyak penelitian-penelitian yang telah dilakukan untuk mempelajari kinetika reaksi gas-cair. Neumann dan Lynn (1986) mempelajari kinetika reaksi H₂S dan SO₂ di dalam larutan organik. Xu *et al.* (1992) mempelajari kinetika absorpsi gas CO₂ ke dalam larutan MDEA aktif. Xu *et al.* (1993) mempelajari kinetika reaksi gas CO₂ dengan larutan *2-Piperidine ethanol*. Wubs dan Beenackers (1993 dan 1994) telah mempelajari kinetika absorpsi gas H₂S di dalam larutan chelat Fe-EDTA. Asai *et al.* (1990) mempelajari kinetika absorpsi gas H₂S ke dalam larutan *Ferric sulfate*. Hikita *et al.* (1975) mempelajari kinetika absorpsi gas chlorine kedalam larutan *Acidic Ferrous Chloride*.

Penelitian kali ini akan mengembangkan model simulasi (teoritis) untuk penghilangan H₂S dari biogas dengan larutan Fe-EDTA di dalam *packed column* menggunakan teori film untuk model perpindahan massa antar fasanya serta data kinetik dan kelarutan yang diperlukan diperoleh dari literatur. Penelitian

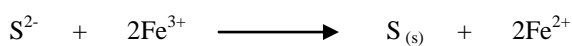
ini diharapkan dapat dijadikan acuan dalam pemurnian gas bio sehingga biogas dapat dipergunakan sebagai bahan bakar alternatif yang aman dan ramah lingkungan.

2. METODOLOGI

Penelitian dilakukan secara teoritis dan eksperimen. Penelitian teoritis dilaksanakan dengan pengembangan model matematik proses absorpsi reaktif gas H₂S ke dalam larutan EDTA pada *packed column*. Model ini digunakan untuk menganalisis pengaruh berbagai variabel proses yang relevan. Penelitian eksperimental digunakan untuk validasi hasil prediksi teoritis.

Pengembangan Model Matematik

Reaksi yang menentukan pada pengembangan model matematik proses absorpsi reaktif gas H₂S ke dalam larutan Fe-EDTA adalah reaksi antara ion S²⁻ dengan ion Fe³⁺. Reaksi tersebut dapat tuliskan sebagai berikut:



Reaksi ini *irreversible* dan memiliki order dua dengan konstanta kecepatan reaksi yang diperoleh dari data De Berry *et al.* (1991

dalam Wub dan Beenackers, 1994). Apabila konstanta kecepatan reaksi tersebut dikorelasikan menggunakan persamaan Arrhenius, akan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$k = 7.7207 \times 10^4 e^{-\frac{31739}{T}} \text{ m}^3 \text{ kmol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

di mana:

T = temperatur (K)

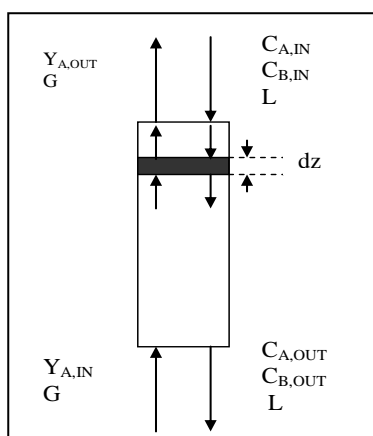
Selain reaksi kimia, pelarutan gas H₂S ke dalam larutan Fe-EDTA juga berpengaruh terhadap kinerja proses. Kelarutan gas H₂S ke dalam larutan Fe-EDTA mengikuti hukum Henry dengan konstanta Henry yang telah ditentukan oleh Wubbs and Beenackers (1994) pada beberapa temperatur. Bila data ini dikorelasikan menggunakan persamaan serupa dengan persamaan Arrhenius maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$He = 358.9 e^{-\frac{975.27}{T}} \text{ (atm m}^3 \text{ kmol}^{-1})$$

di mana:

He = konstanta Henry (atm.kmol/m³)

T = temperatur (K)



Gambar1. Diagram Alir Absorpsi dalam *Packed Column*

Pengembangan model dimulai dengan membentuk persamaan neraca massa komponen A (yaitu H₂S) dalam fasa gas dan B (yaitu Fe-EDTA) dalam fasa *liquid* pada elemen setebal dz pada *packed column*.

Neraca massa ini ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\frac{dY_A}{dz} = \frac{E.k_L a}{G_M} (C_{Ai} - C_{A0}) \quad (3)$$

$$\frac{dC_{B0}}{dz} = -2 \frac{E \cdot k_L \cdot a}{L'} (C_{Ai} - C_{A0}) \quad (4)$$

di mana:

Y_A = Fraksi mol A (H₂S) dalam fasa gas

E = Faktor Peningkatan (*Enhancement factor*)

k_L = Koefisien perpindahan massa fase *liquid* (m/detik)

α = Konstanta pada Persamaan (7)

z = Posisi aksial pada *packed column* (m)

G_M = Laju molar gas per satuan luas (kmol/m²s)

C_{Ai} = Konsentrasi molar A (H₂S) dalam fasa *liquid* pada interface (kmol/m³)

C_{A0} = Konsentrasi molar A dalam badan fasa *liquid* (kmol/m³)

C_{B0} = Konsentrasi molar B (Fe-EDTA) dalam badan fasa *liquid* (kmol/m³)

L' = Laju alir volumetrik *liquid* (m³/detik)

E pada persamaan (3) dan (4) diprediksi dengan menggunakan model film yang penyelesaian pendekatannya diadopsi dari van Krevelen dan Hoftijzer (1948) dalam

$$k_L = \left(\frac{\alpha \cdot D_A}{a} \right) \left(\frac{L}{\mu} \right)^{1-n} \left(\frac{\mu}{\rho \cdot D_A} \right)^{0.5} \quad (7)$$

$$\frac{a}{a_t} = 1 - \exp \left\{ -1.45 (\sigma_c / \sigma)^{0.75} (L / a_t \mu)^{0.1} (L^2 a_t / \rho_G^2)^{-0.05} (L^2 / \rho \cdot \sigma \cdot a_t)^{0.2} \right\} \quad (8)$$

di mana:

α = Konstanta pada Persamaan (7)

μ = Viskositas fasa *liquid* (Pa.s)

ρ = Densitas fasa *liquid* (kg/m³)

ρ = Densitas fasa *liquid* (kg/m³)

ρ_G = Densitas fasa gas (kg/m³)

σ = Tegangan permukaan *liquid* (N/m)

σ_c = Tegangan permukaan kritis untuk material packing (N/m)

L = Kecepatan massa *liquid* (kg/m²s)

Harga α = 550 ft^{-1.46} = 3116.742 m^{-1.46} dan n=0.46 untuk Raschig ring 1 cm (atau 3/8 inchi). Onda *et al.* (1968 dalam Danckwartz, 1970) memberikan korelasi berikut untuk

Danckwartz (1970) dan ditunjukkan pada persamaan (5).

$$\frac{\bar{R}}{k_L C_{Ai}} = E = \frac{\sqrt{M_H \frac{E_i - E}{E_i - 1}}}{\tan h \sqrt{M_H \frac{E_i - E}{E_i - 1}}} \quad (5)$$

$$M_H = \frac{D_A k_2 C_{B0}}{k_L^2}; E_i = \left(1 + \frac{D_B C_{B0}}{z \cdot D_A C_{Ai}} \right) \quad (6)$$

di mana:

\bar{R} = Laju Absorpsi (kmol/m²s)

E_i = Faktor Peningkatan untuk reaksi spontan

M_H = Kwadrat dari bilangan Hatta

D_A = Koefisien difusi A dalam fasa *liquid* (m²/detik)

D_B = Koefisien difusi B dalam fasa *liquid* (m²/detik)

D_G = Koefisien difusi A dalam fasa gas (m²/detik)

Sherwood dan Holloway (1940 dalam Danckwartz, 1970) melaporkan korelasi berikut untuk estimasi harga k_L dan a :

estimasi harga koefisien perpindahan massa sisi gas, k_G :

$$k_G = \left(\frac{5.23G}{P \cdot M} \right) (a_t d)^{-1.7} \left(\frac{G \cdot d}{\mu_G} \right)^{-0.3} \left(\frac{\mu_G}{\rho_G D_G} \right)^{-2/3} \quad (9)$$

di mana:

G = Kecepatan massa gas (kg/m²s)

P = Tekanan (atm)

M = Berat molekul (kg/kmol)

d = Diameter packing (m)

μ_G = Viskositas fasa gas (Pa.s)

a_t = Luas permukaan partikel packing per satuan volume *packed column* (m⁻¹)

Konsentrasi gas H₂S terlarut pada *interface* diperkirakan dari data kelarutan yang mengikuti hukum Henry dan dengan memperhitungkan tahanan sisi gas yaitu:

$$C_{Ai} = \frac{k_G P_A + E.k_L C_A^0}{E.k_L + k_G H_e} \quad (10)$$

di mana:

He = Konstanta Henry (atm.kmol/m³)

k_G = Koeffisien perpindahan massa fase gas (kmol/m²atm.s)

P_A = Tekanan parsial A (atm)

Konstanta Henry *H_e* pada persamaan (10) diperoleh dari Wubs dan Beenackers (1994), sedang sifat sifat fisik yang lain didapat dari Geankoplis (1997).

Persamaan (3) dan (4) merupakan sistem persamaan-persamaan differensial biasa non-linear yang diselesaikan dengan metoda Runge Kutta order 4 untuk menghasilkan profil *Y_A* dan *C_B⁰* dalam kolom. Dari profil ini, persen recovery H₂S dapat diperoleh dari persamaan (11).

$$\% Recovery H_2S = \frac{\frac{Y_{Ain}}{1 - Y_{Ain}} - \frac{Y_{Aout}}{1 - Y_{Aout}}}{\frac{Y_{Ain}}{1 - Y_{Ain}}} \quad (11)$$

di mana:

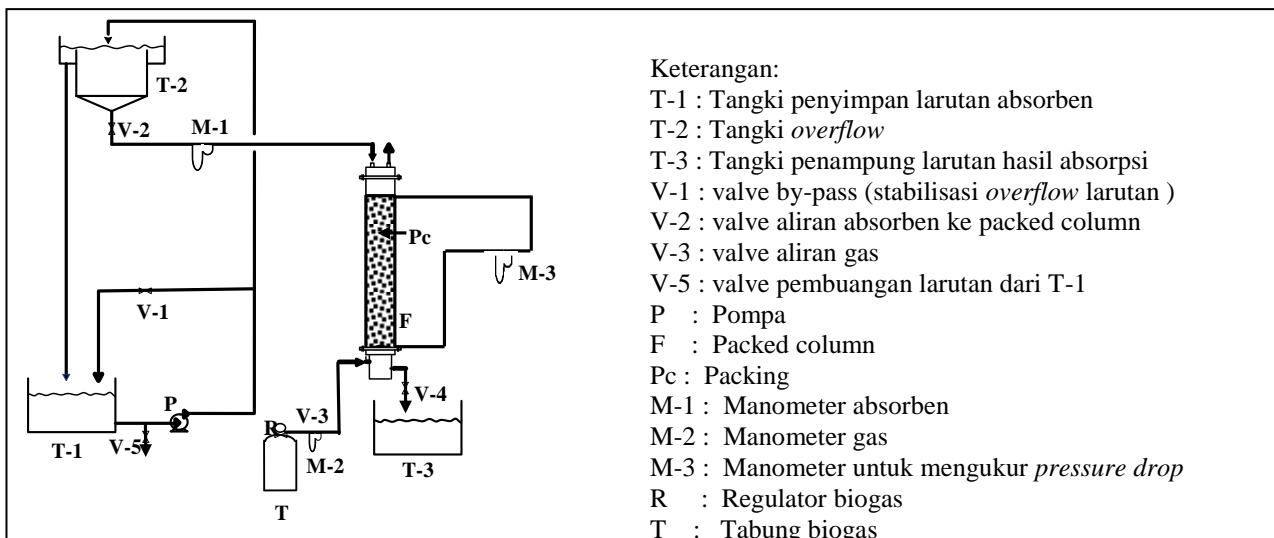
Y_{A,IN} = Molfraksi A dalam aliran gas masuk

Y_{A,OUT} = Molfraksi A dalam aliran gas keluar

Metoda Eksperimen

Penelitian eksperimental dilaksanakan dengan peralatan yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pada eksperimen ini sampel biogas pada saat masuk dan keluar proses dianalisis komposisinya dengan “*chromatography gas*”. Persentase penyisihan H₂S diperoleh dengan membagi beda komposisi masuk dan keluar dengan komposisi masuk.

Penelitian eksperimen dilakukan dengan menggunakan kolom berdiameter 0,1 m yang diisi dengan packing tipe Raschig ring dari aluminium dengan diameter 0,01 m sampai ketinggian 1 m. Biogas yang digunakan pada percobaan ini diperoleh dari hasil percobaan biodegradasi secara anaerobik dari vinase (limbah pabrik alkohol). Hasil percobaan tersebut dilakukan oleh Nonot Suwarno atas dukungan dana penelitian RAPID. Kolom beroperasi pada tekanan 1 atmosfer dan suhu 30⁰C. Absorben yang digunakan adalah larutan 0,02 kmol/m³ Fe-EDTA. Larutan Fe-EDTA dibuat dengan melarutkan FeCl₃ dan EDTA kedalam air. Laju alir gas dibuat konstan 100 mL/s (0,0001 m³/detik), sedang laju alir absorben divariasi 20, 30, dan 40 mL/detik (0,00002, 0,00003, dan 0,00004 m³/detik).



Gambar 2. Skema Peralatan Percobaan

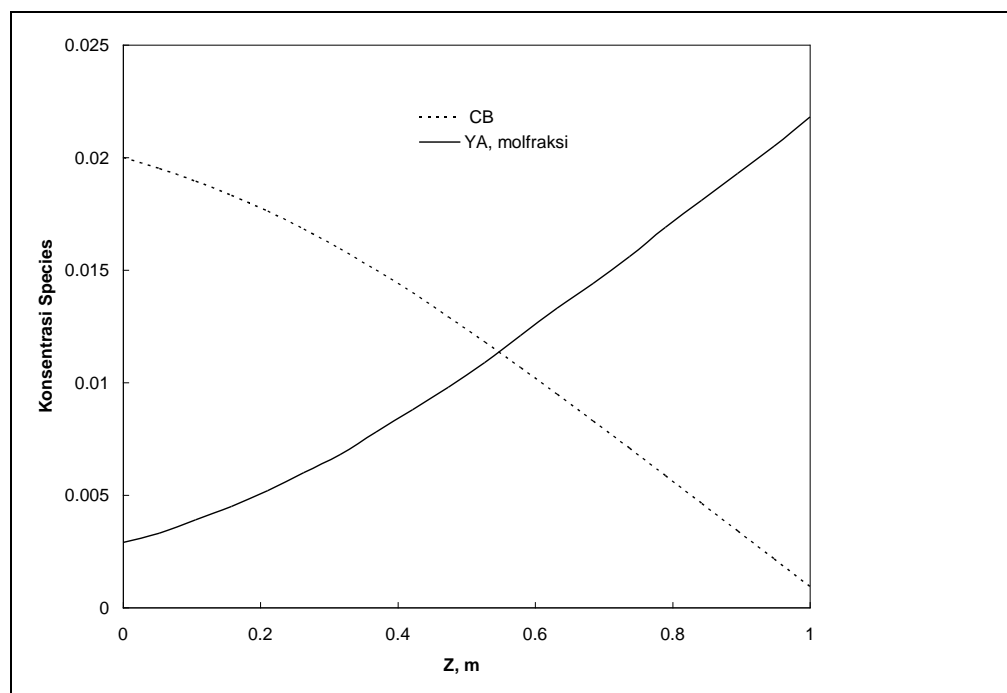
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian simulasi dilakukan pada kolom absorpsi dengan diameter 0,10 m yang diisi dengan packing tipe Raschig ring dengan diameter 0,01 m sampai ketinggian 1 m. Pada penelitian ini dipelajari pengaruh variabel tekanan, suhu, konsentrasi Fe-EDTA pada absorben masuk, dan laju alir absorben terhadap persen H₂S yang terserap. Laju alir gas dibuat tetap yaitu 100 cm³/s, demikian pula konsentrasi gas H₂S di dalam gas masuk adalah 2,2%. Hasil perhitungan simulasi berupa distribusi molfraksi H₂S dalam fasa gas, y_A , pada *packed column*, dan distribusi konsentrasi Fe-EDTA dalam fasa cair, C_B , pada *packed column*. Selain itu hasil perhitungn ini diplot secara grafis pengaruh berbagai variabel proses terhadap % *recovery* H₂S.

Gambar 3 menunjukkan distribusi molfraksi H₂S dalam fasa gas dan distribusi konsentrasi Fe-EDTA dalam fasa *liquid* pada *packed column*. Pada Gambar 3, $z=0$ menunjukkan posisi atas kolom, sedang $z=1$ menunjukkan

posisi bawah kolom. Terlihat bahwa molfraksi H₂S mengalami penurunan dengan cepat dari bawah ke atas. Semakin ke atas kecepatan penurunan molfraksi makin rendah. Sebaliknya konsentrasi Fe-EDTA mengalami penurunan dari atas ke bawah dan makin ke bawah kecepatan penurunannya makin besar. Bentuk profil konsentrasi ini memperlihatkan bahwa tahanan perpindahan massa sisi gas lebih menentukan daripada tahanan sisi *liquid*.

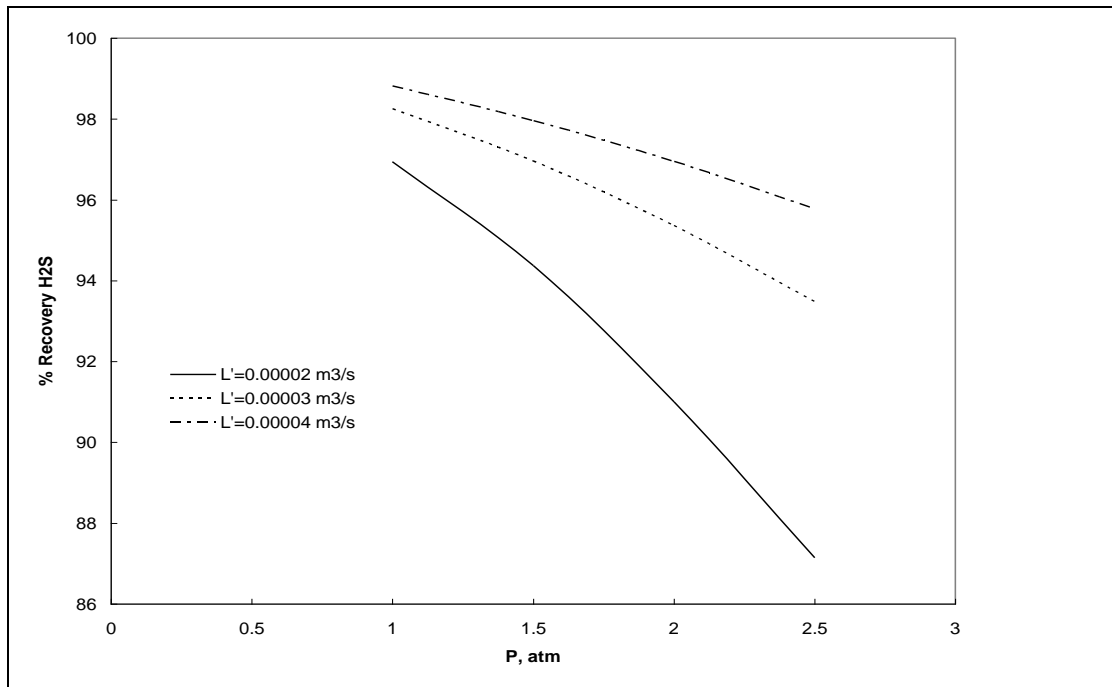
Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa faktor ketahanan film gas lebih memegang kendali daripada faktor kelarutan H₂S dalam larutan. Dengan kata lain proses absorpsi masih didominasi oleh tahanan film gas dari pada tahanan film *liquid*. Kenyataan ini sesuai dengan hasil perhitungan profil kosentrasi yang ditunjukkan pada Gambar 3. Pada proses absorpsi ini, tahanan sisi *liquid* kecil dibandingkan dengan tahanan sisi gas. Hal tersebut dikarenakan reaksi antara gas H₂S dan Fe-EDTA sangat cepat. Reaksi yang sangat cepat ini sangat menurunkan tahanan sisi *liquid*.



Gambar 3. Distribusi Konsentrasi Spesies secara Aksial di dalam *Packed Column*. ($L=20 \times 10^{-6}$ m³/s, $C_{B,IN} = 0,02$ kgmol/m³, $P = 1$ atm)

Hasil dari Gambar 4 menunjukkan bahwa semakin besar tekanan maka H_2S yang terserap semakin kecil. Hasil ini menarik sekali, karena pada umumnya kenaikan tekanan mengakibatkan kenaikan persen penyerapan. Hal ini disebabkan karena

kenaikan tekanan operasi berakibat pada besarnya kelarutan H_2S dalam larutan, sehingga % removal H_2S menjadi lebih besar. Sebenarnya kenaikan tekanan operasi juga akan menaikkan tahanan fasa gas dan hal ini akan menurunkan % penyisihan H_2S .



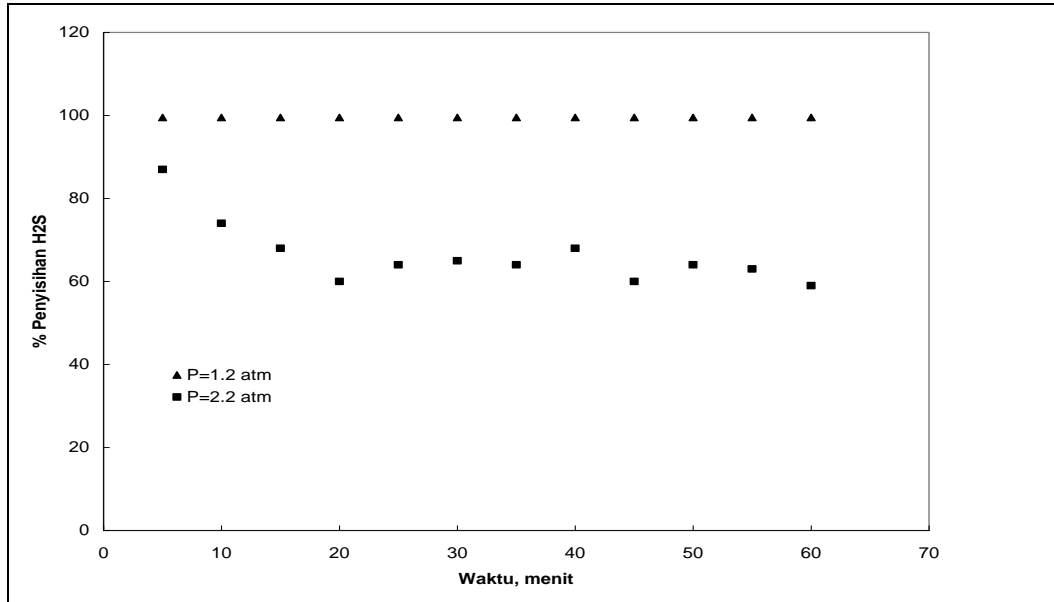
Gambar 4. Pengaruh Tekanan terhadap % Penyisihan H_2S ($C_{Bin} = 0,02 \text{ kgmol/m}^3$, $T = 30^\circ\text{C}$)

Hasil data eksperimen dari Horikawa *et al.* (2004) menunjukkan bahwa kenaikan tekanan juga menurunkan persen penyisihan H_2S (lihat Gambar 5). Sebagaimana telah diuraikan di muka, hal ini disebabkan karena tahanan sisi gas lebih mengendalikan proses absorpsi daripada tahanan sisi *liquid*. Gambar 4 juga menunjukkan pengaruh laju alir absorben terhadap % penyisihan H_2S dan nampak bahwa kenaikan laju alir dari 0,00002 sampai 0,00004 m^3/detik . Hal ini menunjukkan kenaikan % penyisihan H_2S dan nampak juga bahwa untuk laju yang makin besar pengaruh kenaikan tekanan terhadap penurunan % penyisihan H_2S makin rendah.

Gambar 6 menunjukkan pengaruh suhu dan konsentrasi Fe-EDTA dalam absorben masuk terhadap % penyisihan H_2S dan terlihat bahwa makin tinggi suhu, % penyisihan H_2S makin

besar. Fakta ini juga menunjukkan bahwa proses absorpsi ini didominasi oleh tahanan sisi gas. Kenaikan suhu akan menurunkan kelarutan H_2S dalam cairan absorben sehingga menaikkan tahanan sisi *liquid*. Namun kenaikan suhu juga akan menaikkan koefisien transfer massa sisi gas yang mengakibatkan penurunan tahanan sisi gas.

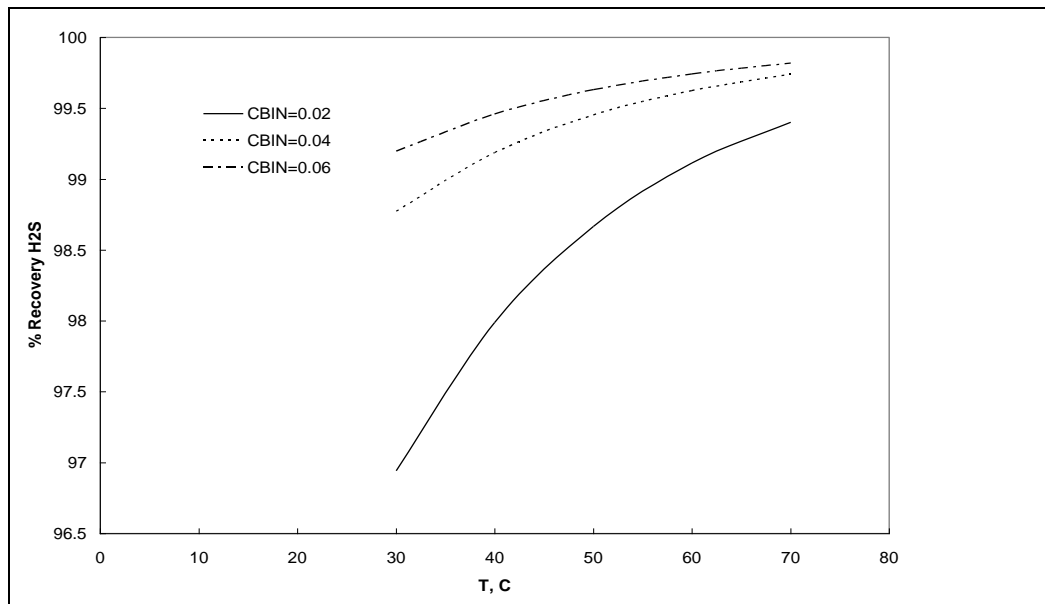
Gambar 6 juga menunjukkan bahwa kenaikan konsentrasi Fe-EDTA dari 0,02 sampai 0,06 kgmol/m^3 masih memberikan pengaruh terhadap kenaikan penyisihan H_2S . Untuk konsentrasi Fe-EDTA pada absorben masuk sebesar 0,06 kgmol/m^3 , suhu 60°C , tekanan 1 atm, dan laju alir absorben 0,00002 m^3/detik % penyisihan gas H_2S sudah mencapai sekitar 99,8% (mendekati angka 100%) dimana tinggi packing hanya 1 meter dan laju alir gas 0,0001 m^3/detik .



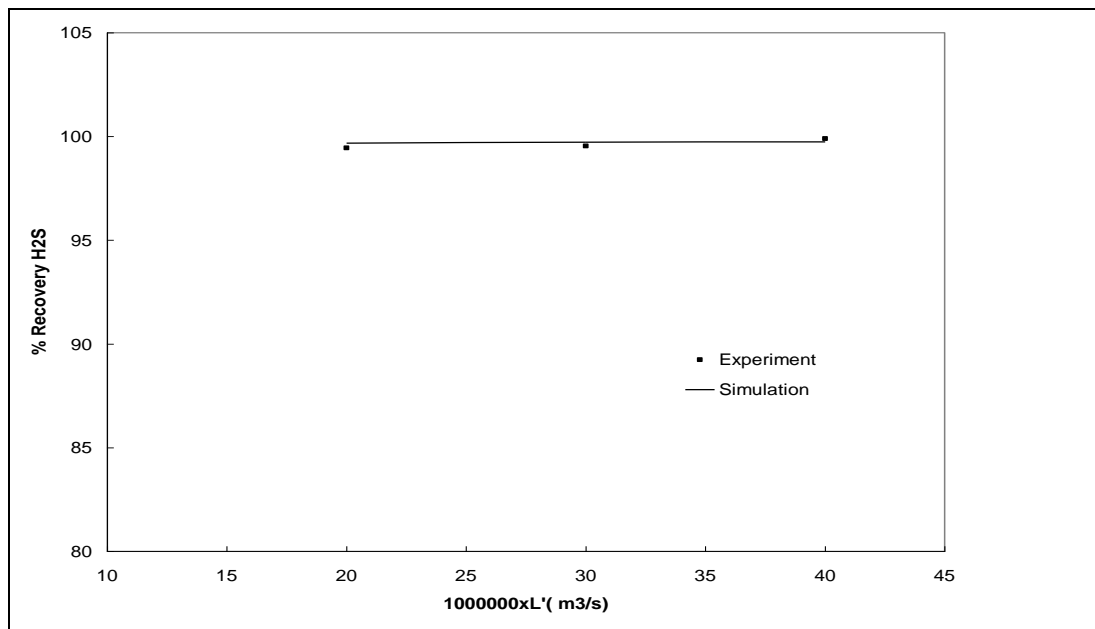
Gambar 5. Pengaruh Tekanan terhadap % Penyisihan H₂S ($C_{Bin}= 0,02 \text{ kgmol/m}^3$, $T=30^0\text{C}$, $G_v = 1000 \text{ cm}^3/\text{menit}$ atau $,000017 \text{ m}^3/\text{detik}$). (Percobaan Horikawa *et al.*,2004)

Hasil prediksi simulasi dibandingkan dengan data eksperimen seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Biogas yang digunakan pada eksperimen mengandung 74,66 % CH₄, 11,2 % CO₂, 9,59 % N₂, 2,35 % O₂ dan 2,2 % H₂S. Terlihat bahwa baik hasil simulasi maupun eksperimen memperlihatkan persen *recovery* yang hampir 100%. Hasil prediksi simulasi juga dibandingkan dengan data eksperimen Horikawa *et al.* (2004). Percobaan Horikawa menggunakan kolom dengan diameter 0,054

m, tinggi packing 0,36 m, konsentrasi Fe-EDTA dalam absorben masuk sebesar 0,2 kgmol/m³, laju alir gas 1000 cm³/menit (0,000017 m³/detik), dan suhu 30⁰C. Untuk tekanan operasi sebesar 2,2 atm, dan laju alir absorben 83,61 cm³/menit (0,0000014 m³/detik), % penyisihan H₂S dari data eksperimen Horikawa adalah 95%. Sedangkan prediksi pada penelitian ini menghasikan % penyisihan gas H₂S sebesar 96,83 %, atau deviasi sebesar kurang dari 3%.



Gambar 6. Pengaruh Suhu terhadap % Penyisihan H₂S ($L' = 0.00002 \text{ m}^3/\text{detik}$, $P = 1 \text{ atm}$)



Gambar 7. Perbandingan Hasil Prediksi Simulasi dan Data Eksperimen ($C_{B,IN} = 0.02 \text{ kmole/m}^3$, $P = 1 \text{ atm}$, $T = 30^\circ\text{C}$, $G_V = 0,000075 \text{ m}^3/\text{detik}$)

KESIMPULAN

Pada kajian teoritis dikembangkan model matematik proses yang terjadi dengan dasar model film untuk perpindahan massa antar fasanya. Di mana anggapan pola alir *plug flow* untuk aliran gas dan *liquid*. Ternyata model ini cukup akurat untuk mendiskripsikan proses yang terjadi dengan penyimpangan kurang dari 3% terhadap data eksperimen. Kenaikan suhu dan penurunan tekanan dapat menaikkan persen penyisihan H_2S . Hasil ini mengindikasikan bahwa proses absorpsi dikendalikan oleh tahanan sisi gas dan regim reaksi sangat cepat. Dengan kata lain larutan Fe-EDTA merupakan absorben yang sangat efektif dalam penyerapan gas H_2S . Dengan menggunakan *packed column* yang diisi raschig ring dengan ketinggian hanya 1 meter dan konsentrasi Fe-EDTA sebesar $0,06 \text{ kmol/m}^3$ dimungkinkan untuk menyerap H_2S dengan persen penyisihan hampir 100%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ucapkan terima kasih pada (1) LPPM ITS atas dana penelitian DIPA untuk penelitian Guru Besar dan DP2M, (2) Dikti

atas hibah penelitian RAPID yang mendukung penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Ubaidi, B.S, M.S.Salim, dan A.A.Shaikh (1990). Non Isothermal Gas Absorption Accompanied by a Second Order Irreversible Reaction. *AIChE J.* 36. 141-146.
- Altway, A. (1995). Pengaruh Volatilitas Reaktan Terlarut Terhadap Harga Faktor Peningkatan Absorpsi Disertai Reaksi Kimia Irreversible Umum. *IPTEK.* 6 (2). 130-137.
- Altway, A., dan 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.* 31 (2).
- Altway, A., Suwarno, N., Andhini, P. dan Astuti, Y. (1995). Penyelesaian Numerik Model Penetrasi untuk Absorpsi Gas disertai Reaksi Kimia Irreversible Umum. *IPTEK.* 6 (2).

- Asai, S., Y. Konishi dan T.Yabu (1990). Kinetics of Absorption of H₂S into Aqueous Ferric Sulfate Solutions. *AIChE J.* 36. 1331-1338.
- Asai,S., Nakamura,H. dan Aikawa, H. (1997). Absorption of H₂S into Aqueous Ferric Chloride Solutions. *Journal of Chemical Engineering of Japan.* 30 (3).
- Astarita, G. (1963). Absorption of Carbon Dioxide into Alkaline Solutions in Packed Tower. *I&EC Fundamentals.* 2 (4).
- Bhattacharya, A, Gholap, R.V. dan Chaudari, R.V. (1997) Gas Absorption with Exothermic Bimolecular (1,1 Order) Reacton. *AIChE J.* 33. 1507-1513.
- Brian, P.L.T., Hurley, J.F. dan Hasseltine, E.H. (1961) Penetration Theory for Gas Absorption Accompanied by a Second Order Chemical Reaction. *AIChE J.* 7. 226.
- Broekhuis, R.R., Koch, D.J., dan Lynn, S. (1992) A Medium-Temperature Process for Removal of H₂S from Sour Gas Stream with Aqueous Metal Sulfate Solutions. *Ind. Eng. Chem. Res.* 31. 2635-2642.
- Danckwartz FRS, P.V. (1970) Gas Liquid Reaction. McGraw Hill, New York.
- Danckwartz, P.V. dan Gillham, A.J. (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. T42-T54.
- Davidson, J.M., Lawrie,C.H., dan Sohail, K. (1995) Kinetics of the Absorption of H₂S by High Purity and High Surface Area Zinc Oxide. *Ind Eng Chem. Res.* 34. 2981-2989.
- Demmink, J.F, dan Beenackers,A.A.C.M. (1998). Gas Desulfurization with Ferric Chelates of EDTA and HEDTA: New Model for the Oxidative Absorption of H₂S. *Ind. Eng. Chem. Res.* 37 (4). 1444-1453.
- Effendi, M dan Ikhlas, M. (2001). Simulasi Absorpsi Gas Disertai Reaksi Kimia Irreversible Order Dua Pada Kondisi NonIsothermal. Skripsi, Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, Jurusan Teknik Kimia, FTI, ITS.
- Geankoplis,C.J. (1997). Transport Process and Unit Operations. 3rd Ed. Prentice-Hall of India.
- Glasscock,D.A. dan Rochelle, G.T. (1993). Approximate Simulation of CO₂ and H₂S Absorption into Aqueous Alkalineamine. *AIChE Journal.* 39 (8).
- Horikawa, M.S., F.Rosi, M.L. Gimenes, C.M.M. Costa, dan M.G.C. da Silva, (2004). Chemical Absorption of H₂S for Biogas Purification. *Brazilian Journal of Chemical Engineering.* 21 (03). pp. 415-422.
- Hikita, H. dan Asai,S. (1964). Gas Absorption with (m,n)-th Order Irreversible Chemical Reaction. *Int. Chem. Eng.* 4. 332.
- Hix, R.M. dan Lynn, S. (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. 930-939.
- Huang, C.J. dan Kuo, C.H. (1965). Mathematical Models for Mass Transfer Accompanied Reversible Chemical Reaction. *AIChE Journal.* (11). 901-910.
- Kikuchi, T., Komori, N., Noguchi, H., Honna, K., dan Iida, H. (1991). A New Process for Hydrogen and Sulfur Recovery from H₂S. World Congress of Chemical Engineering, Karlsruhe, Germany.
- King, C.J. (1966). Turbulent Liquid-Phase Mass Transfer at a Free Gas-Liquid Interface", *Ind.Eng.Chem.Fund.* 5 (1). 1-8.

- Kohl, A.L. dan Riesenfeld, F.C. (1985) Gas Purification. Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- 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).
- Paiva, J.L. de dan Kachan, G.C. (1998). Modeling and Simulation of a Packed Column for NO_x Absorption with Hydrogen Peroxide. *Ind. Eng. Chem. Res.* 37. 609-614.
- Qian,W.,Yi-gui Li, dan Mather, A.E. (1995). Correlation and Prediction of Solubility of CO₂ and H₂S in an Aqueous Solution of Methyldiethanolamine and Sulfone. *Ind.Eng.Chem.Res.*34 (7).
- Sanyal,D., Vasishtha, N., dan Saraf, D.N. (1988). Modeling of Carbon Dioxide Absorber Using Hot Carbonate Process. *Ind.Eng.Chem.Res.* 27 (11).
- Savitri, Y., Sepfitri, E., dan Altway, A. (2001) Simulasi Absorpsi Gas Disertai Reaksi Kimia Irreversible Order Dua pada Packed Column dalam Kondisi NonIsothermal. *Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses.*
- Soewarno, N., Wibawa,G., dan Puspita,N.F. (1991). Anaerobic Digestion of Distillary Slop in ITS Biogas Pilot Plant. *International Association on Water Pollution Research and Control (IAWWPC) Conference on Appropriate Waste Management Technologies*, Nov. 27-29, Perth, Australia,
- Toor, H.L. dan Maechello, J.M. (1958) Film-Penetration Model for Mass and Heat Transfer. *A.I.Ch.E. Journal.* 4 (1). 97-101.
- Vas Bhat, R.D., Swaaij, W.P. van, Benes, N.E., Kuipers, J.A.M., dan Versteeg,G.F. (1997). Non-isothermal gas Absorption with reversible chemical reaction. *Chemical Engineering Science.* 52. 4079-4094.
- Xu G.W., Cheng-Fang Zhang, Shu-Jun Qin, dan Wang, Yi-Wei (1992). Kinetics Study on Absorption of Carbon Dioxide into Solution of Activated Methyldiethanolamine. *Ind.Eng.Chem.* 31. 921-927.
- Xu,S.,Yi-Wei Wang, F.D.Otto dan Mather, A.E. (1993). Kinetics of The Reaction of Carbon Dioxide With Aqueous 2-Piperidineethanol Solutions. *AIChI Journal.* 39 (10).
- Wijaya, R.P, dan Altway, A. (2007). Simulasi Hidrodinamika dan Transfer Massa Disertai Reaksi Kimia pada Absorpsi CO₂ dengan Larutan Benfield didalam Packed Column. *Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses.* UNDIP, Semarang,
- Wubs, H.J. dan Beenackers, A.A.C.M. (1993). Kinetics of the Oxidation of Ferrous Chelates of EDTA and HEDTA into Aqueous Solutions. *IND. Eng. Chem. Res.* 32. pp.2580-2594.
- Wubs, H.J. dan Beenackers, A.A.C.M. (1994). Kinetics of the Oxidation of Ferrous Chelates of EDTA and HEDTA into Aqueous Solutions. *IND. Eng. Chem. Res.* 40 (3). pp.433-444
- Yunita D. Indrasari, Serpara, Koatlely A., Altway, A., dan 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..