

PEMODELAN MATEMATIS ADSORPSI CO₂ DENGAN STRONG BASE ANION EXCHANGE RESIN SEBAGAI ADSORBEN UNTUK PURIFIKASI BIOGAS

MATHEMATICAL MODELLING IN CO₂ ADSORPTION USING STRONG BASE ANION EXCHANGE RESIN AS ADSORBENT FOR BIOGAS PURIFICATION

Anies Mutiari¹, Wiratni², Aswati Mindaryani²

¹Balai Besar Bahan dan Barang Teknik, Jl. Sangkuriang No. 14 Bandung 40135

²Jurusan Teknik Kimia Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta 55281

Email: anies.mutiari@yahoo.com

Diterima: 8 April 2015

Direvisi: 13 Mei 2015

Disetujui: 4 Juni 2015

ABSTRAK

Pemurnian biogas telah banyak dilakukan untuk menghilangkan kadar CO₂ dan meningkatkan kandungan CH₄ yang terkandung di dalamnya. Kandungan CH₄ yang tinggi akan memberikan unjuk kerja yang lebih baik. Model matematis proses adsorpsi CO₂ disusun berdasarkan teori lapisan film antar fasa, dimana pada proses yang ditinjau terdapat tiga fase yaitu gas, cair dan padat. Model matematis dari data eksperimental kecepatan dan kesetimbangan proses adsorpsi CO₂ melalui mekanisme pertukaran ion di suatu kolom adsorpsi telah dibuat. Model ini dibuat untuk mencari konstanta yang dapat dipergunakan pada proses *scale up* data laboratorium ke skala *pilot plant*. Parameter proses kecepatan yang dicari nilainya adalah koefisien transfer massa volumetris CO₂ pada fase cair ($k_{L,a}$), koefisien transfer massa volumetris CO₂ pada fasegas ($k_{G,a}$) dan tetapan laju reaksi (k_1 dan k_2). Pada hasil penelitian ini ditunjukkan bahwa nilai parameter yang diperoleh sesuai hasil *fitting* data dengan model matematis yang digunakan, yaitu model transfer massa pada lapisan film antar fase secara seri: adalah $k_{G,a}$, $k_{L,a}$, k_1 dan k_2 dengan nilai *Sum of Squares Error* (SSE) rata-rata 0,0431. Perbandingan nilai $k_{G,a}$ hasil simulasi dan teoritisnya memberikan kesalahan rata-rata 18,79%. Perbandingan nilai $k_{L,a}$ hasil simulasi dan teoritis memberikan kesalahan rata-rata 7,92%.

Kata kunci: model matematis, adsorpsi CO₂, pemurnian biogas

ABSTRACT

Biogas purification processes are widely conducted to remove CO₂ content and enhance CH₄ content. High content of CH₄ will increase the performance of biogas significantly. Mathematical modelling in adsorption processes were derived from the two film theory. The gas phase, liquid phase and solid phase were reviewed. Mathematical modelling was derived from the rate processes and equilibrium experiment in chemical adsorption of CO₂ by ion exchange mechanism in a packed column. Mathematical modelling was purposed to get the coefficients value which was needed to scale up the processes or to design the process equipment. The rate processes coefficients value sought from the simulation was volumetric mass transfer coefficient of CO₂ in the liquid phase ($k_{L,a}$), volumetric mass transfer coefficient of CO₂ in the gas phase ($k_{G,a}$) and the reaction rate coefficients (k_1 and k_2). The Sum of Squares Error (SSE) value of rate processes parameters $k_{G,a}$, $k_{L,a}$, k_1 and k_2 were 0.0431 in average. The model predictions value of $k_{G,a}$ and $k_{L,a}$ were compared to the theoretical value and the error were 18.79% and 7.29%, respectively.

Keywords: mathematical modelling, CO₂ adsorption, biogas purification

PENDAHULUAN

Biogas sebagai salah satu sumber energi baru dan terbarukan telah banyak dimanfaatkan. Namun pemanfaatannya masih terbatas karena komposisi metana (CH_4) di dalam biogas hanya sekitar 55-70%. Komponen penyusun biogas yang lain adalah karbondioksida (CO_2) sebesar 25-50%, nitrogen (N_2) sekitar 0-5%, uap air (H_2O) 1,5%, gas sulfur (H_2S) sebesar 0-0,5% dan amoniak (NH_3) 0-0,05%. Keberadaan gas CO_2 berdampak pada turunnya kualitas biogas karena mengurangi nilai kalori pembakaran dan memenuhi ruang apabila akan dikompresi [1]. Dari kondisi tersebut diperlukan usaha untuk meningkatkan konsentrasi metana dalam biogas dengan melakukan pemurnian setelah biogas dihasilkan dari biodigester. Proses pemurnian biogas di Indonesia pada saat ini bertujuan untuk dapat diaplikasikan di pedesaan ataupun sentra-sentra peternakan sapi. Di tempat-tempat tersebut, pembuatan biodigester untuk memanfaatkan biogas telah dilakukan dengan teknologi yang sederhana dan telah dimanfaatkan sebagai bahan bakar kompor gas maupun lampu penerangan [2].

Menurut Mutiari dkk. [4], proses pemurnian biogas yang mudah dan murah dapat dilakukan dengan metode adsorpsi dengan bahan isian *strong base anion exchange resin*. Penelitian yang telah dilakukan menyebutkan bahwa jenis resin tersebut mampu menghilangkan kandungan CO_2 yang terkandung di dalam biogas hingga 100%. Penelitian tersebut telah dilakukan pada skala laboratorium.

Model matematis merupakan suatu cara untuk menggambarkan suatu proses fisis di dalam persamaan matematis (4). Pada penelitian ini disusun model matematis proses adsorpsi CO_2 yang melibatkan transfer massa disertai reaksi kimia. Dari penyelesaian model matematis secara numerik dan data hasil percobaan di laboratorium akan diperoleh data-data koefisien transfer massa dan konstanta kecepatan reaksi pada adsorpsi CO_2 menggunakan bahan isian *strong base anion exchange resin*. Data-data kinetika tersebut sangat berguna pada perancangan alat dalam skala *pilot plant* maupun dalam skala yang lebih besar di industri. Tujuan penelitian ini adalah untuk menyusun model matematis dan menyelesaikan secara numeris pada proses adsorpsi CO_2 menggunakan bahan isian *strong base anion*

exchange resin, sehingga diperoleh nilai koefisien transfer massa dan konstanta kecepatan reaksi yang berguna pada perancangan alat dalam skala *pilot plant* maupun dalam skala yang lebih besar di industri.

BAHAN DAN METODE

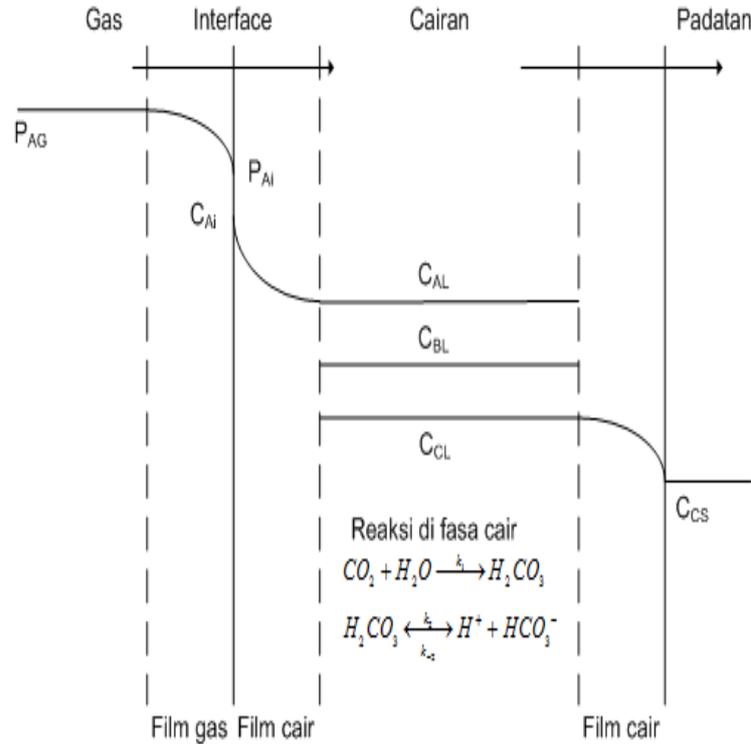
Bahan yang digunakan dalam model matematis ini adalah data hasil penelitian skala laboratorium [3]. Pada proses adsorpsi CO_2 di permukaan resin, proses transfer dimulai saat CO_2 di fase gas dikontakkan dengan resin yang dibasahi air di dalam suatu kolom. Tinjauan transfer massa dikaji pada setiap fase untuk mengurangi kompleksitas dari proses yang terjadi. Asumsi yang diambil dalam penentuan mekanisme transfer massa ini adalah bahwa proses transfer massa berlangsung secara seri.

Mekanisme Reaksi dalam Sistem Gas-Cair-Padat

Pada proses adsorpsi CO_2 ke dalam sistem air-resin, CO_2 yang terlarut akan mengalami perpindahan massa antar fase dilanjutkan dengan reaksi pertukaran ion di permukaan resin. Dengan asumsi bahwa mekanisme tersebut berlangsung seri maka sesuai teori lapisan film pada proses transfer antar fase, dapat digambarkan bahwa kejadian fisis dari proses yang berlangsung seperti pada Gambar 1.

Mekanisme transfer massa (Gambar 1) adalah transfer massa antar fase yang terjadi dari fase gas menuju fase cair kemudian dilanjutkan transfer massa ke padatan. Secara detail, mekanisme yang terjadi sebagai berikut:

- (1) Transfer massa CO_2 dari badan gas (P_{AG}) menuju *interface* gas-cair melalui gas film (P_{Ai}),
- (2) Transfer massa CO_2 dari *interface* gas-cair (C_{Ai}) menuju badan cairan,
- (3) Reaksi CO_2 di fase cair (C_{AL}) dengan H_2O menghasilkan H_2CO_3 di badan cairan (C_{BL}),
- (4) Reaksi ionisasi H_2CO_3 menjadi H^+ dan HCO_3^- (C_{CL}),
- (5) Transfer massa HCO_3^- dari badan cairan menuju permukaan padatan,
- (6) Reaksi pertukaran ion HCO_3^- di permukaan padatan (C_{CS}) dengan monomer gugus fungsi penyusun resin di dalam padatan.



Gambar 1. Mekanisme Transfer Massa Antar Fase pada Proses Adsorpsi CO₂ menggunakan Strong Base Anion Exchange Resin

Menurut Mutiari dkk. [6], resin yang digunakan mempunyai kapasitas maksimal yang dicapai pada saat seluruh gugus fungsi telah mengalami pertukaran ion dengan HCO₃⁻. Oleh karena itu, mekanisme pada langkah 6 didekati menggunakan kesetimbangan adsorpsi. Model Langmuir dipilih untuk memberikan hubungan konsentrasi HCO₃⁻ di fase cair dan padatan.

Proses transfer pada sistem yang ditinjau dapat dituliskan sebagai berikut : Menurut Fogler [6], teori lapisan film yang melibatkan fase gas dan fase cair dapat dinyatakan secara matematis sesuai dengan persamaan (1), (2) dan (3). Transfer massa CO₂ (A) dari fase gas ke *interface* dinyatakan pada persamaan (1).

$$N_A = k_G a (P_{AG} - P_{Ai}) \quad (1)$$

Kesetimbangan gas-cair untuk CO₂ di *interface* dinyatakan pada persamaan (2).

$$P_{Ai} = H \cdot C_{Ai} \quad (2)$$

Proses transfer massa CO₂ (A) dari *interface* ke fase cair dapat dinyatakan dengan persamaan (3).

$$N_A = k_L a (C_{Ai} - C_{AL}) \quad (3)$$

Reaksi CO₂ (A) dengan H₂O menghasilkan H₂CO₃ (B) di fase cair dapat dinyatakan seperti persamaan (4).

$$-r_A = k_1 C_{AL} \varepsilon_L \quad (4)$$

Kinetika reaksi ionisasi H₂CO₃ (B) menjadi H⁺ dan HCO₃⁻ (C) di fase cair mengikuti mekanisme seperti pada persamaan (5).

$$-r_B = (k_2 C_{BL} - k_{-2} C_{CL}^2) \varepsilon_L \quad (5)$$

Transfer massa HCO₃⁻ (C) dari fase cair ke padatan

$$N_C = k_C a (C_{CL} - C_{CS}) \quad (6)$$

Menurut Mutiari [5], hubungan kesetimbangan cair-padatan untuk HCO₃⁻ (C_{CS}) didekati dengan model kesetimbangan Adsorpsi Langmuir sebagai berikut:

$$C_{\mu} = \frac{bC_{\mu\max}C_{CS}}{1+bC_{CS}} \quad (7)$$

Nilai $b = 0,0068 \text{ g HCO}_3^-/\text{g resin}$
 dan $C_{\mu\max} = 243,36 \text{ m}^3/\text{mol}$.

Dari substitusi persamaan (1) hingga persamaan (6) diperoleh:

$$P_{AG} = \frac{N_A}{k_G a} + H \cdot \left(\frac{N_A}{k_L a} + \frac{-r_A}{k_1 \varepsilon_L} \right) \quad (8)$$

Menurut Levenspiel [7], pada suatu proses kecepatan yang berlangsung secara seri dan telah tercapai kondisi *steady state* maka nilai $N_A = -r_A$ sehingga persamaan (8) dapat disederhanakan menjadi persamaan (9).

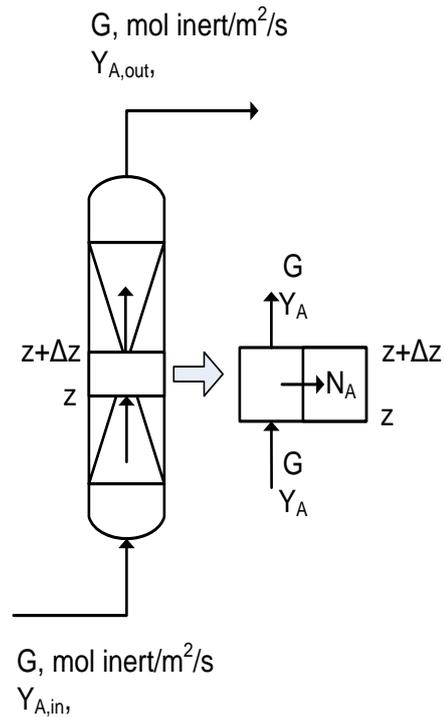
$$N_A = -r_A = \frac{P_{AG}}{\left[\frac{1}{k_G a} + H \cdot \left(\frac{1}{k_L a} + \frac{1}{k_1 \varepsilon_L} \right) \right]} \quad (9)$$

Model Matematis

Percobaan yang dilakukan pada kolom adsorpsi ditujukan agar reaksi pertukaran ion mulai jenuh pada bagian bawah sebelum bagian atasnya. Proses penjuhan tersebut menimbulkan adanya perbedaan proses penjuhan berdasarkan perbedaan tinggi kolom yang digunakan. Perubahan penjuhan tersebut dapat diamati menggunakan kurva *breakthrough* [8]. Kurva tersebut dapat digunakan untuk mengetahui waktu regenerasi yang diperlukan resin untuk kembali ke *performance* awalnya.

Dari percobaan yang dilakukan dalam kolom resin disusun model matematis yang dapat diverifikasi menggunakan data kurva *breakthrough*. Penyusunan model matematis diambil pada elemen volum di kolom adsorpsi.

- $d = 10 \text{ cm}$
- $L = 30 \text{ cm};$
- $\varepsilon_L = 0,75;$
- $\varepsilon_G = 0,175;$
- $\varepsilon_S = 0,75;$



Gambar 2. Skema Kolom Adsorpsi

Gambar 2 adalah sketsa dari proses fisis yang terjadi yang dapat dibuat neraca massa pada elemen volum kolom *fixed bed* yang disusun dengan mengambil asumsi:

- (1) Kondisi isothermal,
- (2) Kecepatan aliran arah aksial bernilai konstan,
- (3) Gradien konsentrasi arah radial diabaikan,
- (4) Perpindahan massa karena difusi aksial diabaikan.

Persamaan-persamaan yang diperoleh dari neraca massa di masing-masing proses dinyatakan dalam persamaan (10) sampai dengan persamaan (14). Dari neraca massa CO_2 di fase gas dalam elemen volum Δz diperoleh persamaan (10).

$$\frac{\partial C_{AG}}{\partial t} = -\frac{G}{\varepsilon_G} \frac{\partial Y_i}{\partial z} - \frac{P_{AG}}{\varepsilon_G \left[\frac{1}{k_G a} + H \cdot \left(\frac{1}{k_L a} + \frac{1}{k_1 \varepsilon_L} \right) \right]} \quad (10)$$

Dari neraca massa CO_2 di fase cair dalam elemen volum Δz diperoleh persamaan (11).

$$\frac{\partial C_{AL}}{\partial t} = \frac{P_{AG}}{\varepsilon_L \left[\frac{1}{k_G a} + H \cdot \left(\frac{1}{k_L a} + \frac{1}{k_1 \varepsilon_L} \right) \right]} \quad (11)$$

Dari neraca massa H₂CO₃ di fase cair dalam elemen volum Δz diperoleh persamaan (12).

$$\frac{\partial C_{BL}}{\partial t} = \left(k_1 C_{AL} - \left(k_2 C_{BL} - k_{-2} C_{CL}^2 \right) \right) \quad (12)$$

Dari neraca massa HCO₃⁻ difase cair dalam elemen volum Δz diperoleh persamaan (13).

$$\frac{\partial C_{CL}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_L} \left(\left(k_2 C_{BL} - k_{-2} C_{CL}^2 \right) \varepsilon_L + k_c a \left(C_{CL} - \frac{C_\mu}{K_L (C_{\mu\max} - C_\mu)} \right) \right) \quad (13)$$

Neraca massa HCO₃⁻ teradsorpsi di permukaan resin persamaan (14).

$$\frac{\partial C_\mu}{\partial t} = k_c a \left(C_{CL} - \frac{C_\mu}{b (C_{\mu\max} - C_\mu)} \right) \frac{BM_C}{\rho_b \varepsilon_P} \quad (14)$$

diperoleh 5 persamaan diferensial dengan kondisi batas dan awal untuk persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

pada t=0, disemua posisi z maka C_{AG}=0; C_{AL}=0; C_{BL}=0; C_{CL}=0; C_μ=0.

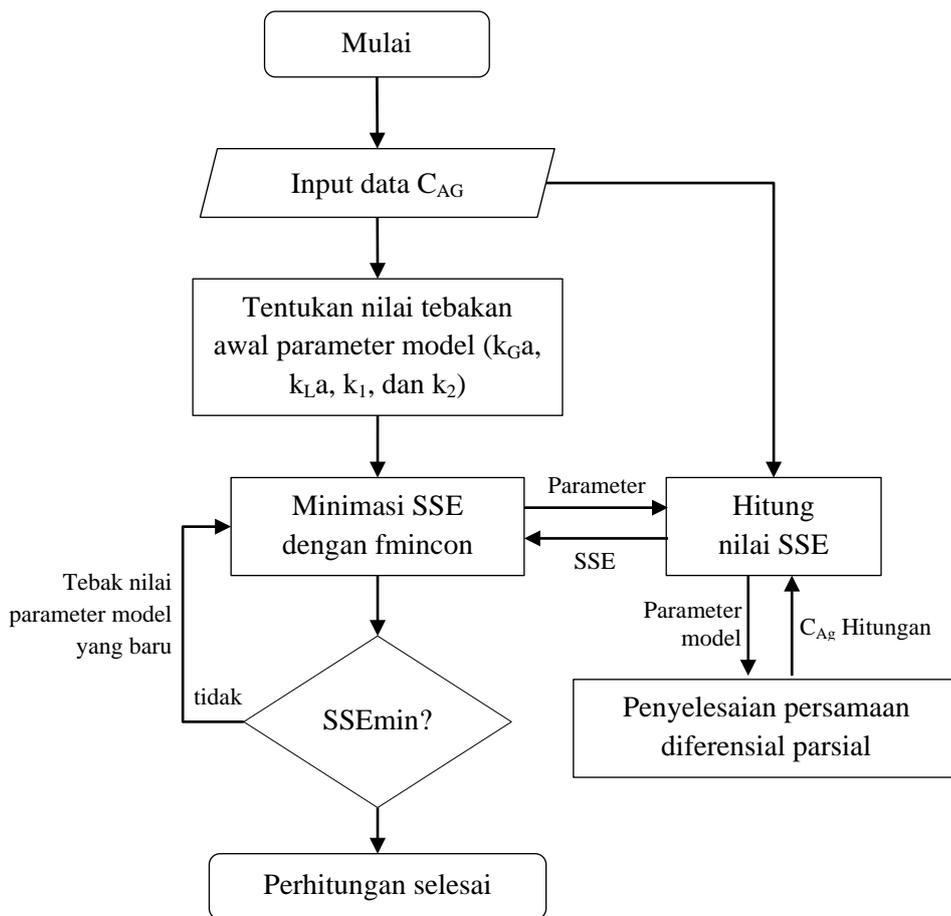
pada t=t pada z=0 maka C_{AG}=C_{AGO}

Persamaan (10) sampai (14) diselesaikan secara simultan menggunakan algoritma pada Gambar 3. Parameter yang dicari adalah k_{La}, k_{Ga}, k₁ dan k₂.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data eksperimen yang digunakan untuk *fitting* dengan hasil simulasi adalah hasil eksperimen skala laboratorium dari Mutiari dkk [4]. Efek variasi laju alir gas dan perbandingan air terhadap resin dipelajari dengan model matematis. Optimasi proses dilakukan dengan simulasi terhadap model matematis yang digunakan.

Pada proses adsorpsi terdapat 2 unsur penting, yaitu mekanisme kesetimbangan dan kinetika. Mekanisme kesetimbangan didasarkan pada kapasitas padatan untuk menyimpan atau menyerap spesies (adsorbat) yang berbeda.



Gambar 3. Algoritma Program untuk Menentukan Nilai Parameter Proses Kecepatan

Mekanisme kinetika didasarkan pada kecepatan penyebaran (difusi) spesies yang berbeda untuk masuk ke pori padatan dimana terjadi proses adsorpsi. Variasi laju alir gas akan memberikan pengaruh pada difusi CO₂ di dalam sistem.

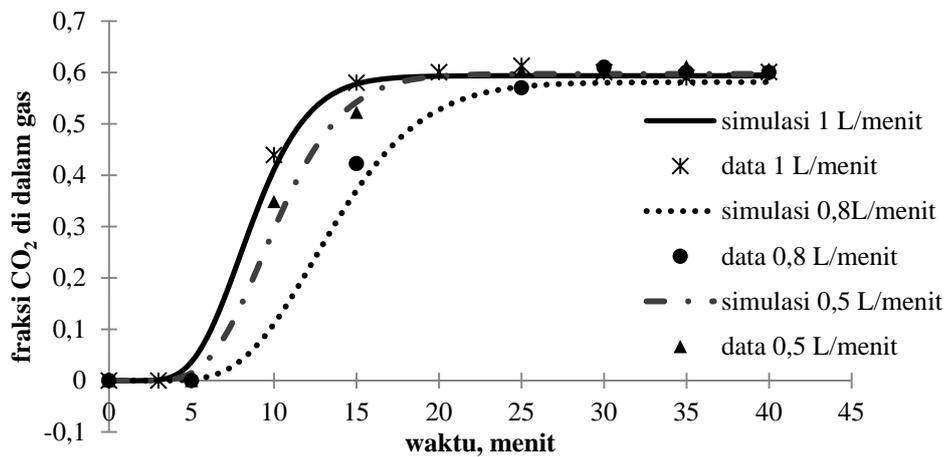
Hasil Fitting Data dengan Simulasi

Gambar 4 menunjukkan data penelitian dan hasil simulasi yang diambil dengan menggunakan variasi laju alir gas yang masuk ke kolom adsorpsi. Laju alir gas masuk ke dalam kolom adsorpsi dilakukan dengan tiga variasi, yaitu 0,5; 0,8 dan 1 L/menit.

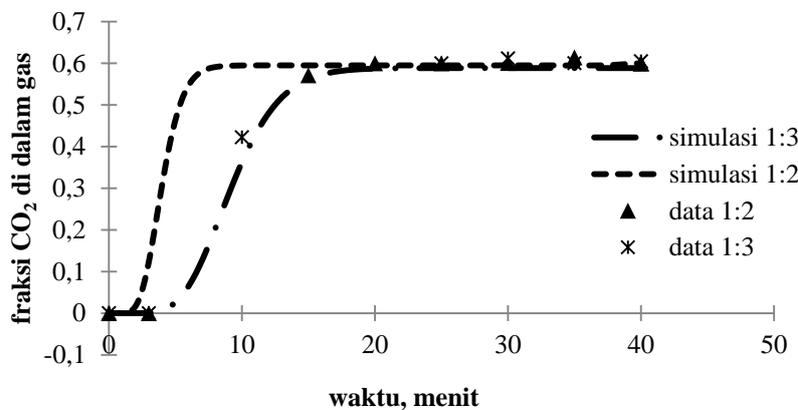
Dalam penyusunan model matematis yang diajukan, perbandingan air terhadap resin dinyatakan dalam *hold up* cairan (ϵ_L) dan *hold up* padatan (ϵ_p). Perbandingan tersebut dilakukan dengan memvariasikan berat air dan berat resin, yaitu 1:2 dan 1:3. Kecepatan aliran gas yang

digunakan adalah 0,5 L/menit. Hasil simulasi dan data hasil percobaan ditunjukkan pada Gambar 5.

Gambar 4 menunjukkan semakin besar laju alir gas, maka semakin cepat tercapai waktu jenuhnya. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penyebaran adsorbat akan semakin cepat pada kecepatan aliran yang lebih besar. Kondisi tersebut sesuai dengan profil kecepatan 1 L/menit dan 0,8 L/menit. Pada saat digunakan laju alir gas 1 L/menit, kolom adsorpsi menjadi lebih cepat jenuh dibandingkan laju alir gas 0,8 L/menit. Untuk laju alir gas 0,5 L/menit tidak menunjukkan kecenderungan yang sama. Pada laju alir gas 0,5 L/menit terlihat lebih cepat mencapai kondisi jenuhnya dibandingkan dengan laju alir gas 0,8 L/menit. Hal ini disebabkan oleh laju alir gas kecil, sehingga laju alir gas tersebut belum cukup mampu menyebabkan turbulensi yang cukup untuk mendukung terjadinya proses berikutnya.



Gambar 4. Hasil Fitting Data dan Simulasi untuk Variasi Laju Alir



Gambar 5. Hasil Fitting Data dan Simulasi untuk Variasi Perbandingan Air dan Resin

Hasil percobaan (Gambar 5), menunjukkan semakin besar jumlah air dengan jumlah resin yang tetap, penyerapan akan berlangsung lebih cepat. Hal ini disebabkan semakin besar jumlah air maka H₂CO₃ yang terbentuk akan semakin banyak. Kondisi tersebut berbanding lurus dengan jumlah HCO₃⁻ yang terion. Dengan jumlah resin yang sama, sementara resin mempunyai kapasitas maksimum maka sistem dengan jumlah air yang lebih banyak akan menjadi lebih cepat jenuh. Proses yang diinginkan adalah yang memberikan waktu penenuhan cukup lama. Hal ini berkaitan dengan operasional dari proses adsorpsi menggunakan resin. Waktu regenerasi yang lama akan lebih disukai karena secara operasional lebih mudah dilakukan.

Analisis Parameter Hasil Optimasi

Dari hasil optimasi parameter k_{Ga} yang ditampilkan pada Tabel 1 dapat disimpulkan bahwa nilai koefisien transfer massa (k_{Ga}) pada sistem adsorpsi CO₂ menggunakan *strong base anion exchange* resin dipengaruhi oleh laju alir CO₂. Semakin besar laju alir CO₂, semakin besar pula nilai k_{Ga} yang diperoleh. Hal ini disebabkan semakin besarnya laju alir umpan yang masuk akan meningkatkan turbulensi pada aliran sehingga memperbesar bilangan Reynolds (Re). Hubungan Re dengan nilai k_{Ga} ditampilkan pada persamaan (16) dan (17).

Pada Tabel 1, parameter yang merupakan hasil optimasi dari proses simulasi adalah k_{Ga},

k_{1a}, k₁ dan k₂. Nilai k₂ diperoleh dari data kesetimbangan reaksi ionik HCO₃⁻ menurut persamaan (5). Nilai k_{ca} didekati dengan nilai koefisien transfer massa volumetris untuk proses absorpsi menggunakan bahan isian. Nilai k_{ca} untuk proses absorpsi CO₂ menggunakan air dengan bahan isian adalah 25–39 jam⁻¹.

Pada persamaan (9) telah diketahui nilai tahanan total dari mekanisme penyerapan CO₂ menggunakan *strong base anion exchange* resin. Dari persamaan (9) dapat dihitung tahanan di masing-masing fase. Hasil perhitungan tahanan transfer massa dan reaksi kimia ditunjukkan pada Tabel 2. Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa untuk variasi laju alir 1 dan 0,8 L/menit tahanan yang mengontrol adalah tahanan transfer massa di lapisan film cair.

Untuk variasi laju alir 0,5 L/menit tahanan yang mengontrol adalah tahanan transfer massa di lapisan film gas. Untuk variasi perbandingan air terhadap resin 1:2 yang mengontrol adalah tahanan transfer massa di lapisan film gas. Sementara untuk perbandingan 1:3 yang mengontrol adalah tahanan transfer massa di lapisan film gas.

Levenspiel [7] menyebutkan bahwa untuk suatu sistem heterogen dimana tahanan paling besar berada di lapisan film gas atau cairan, maka salah satu cara yang dapat ditempuh untuk mempercepat laju prosesnya adalah dengan cara menggunakan kontaktor untuk memperbesar *interfacial surface area*.

Tabel 1. Hasil Optimasi Simulasi Model terhadap Data Percobaan

Variabel	k _{Ga} mol/s/m ³ /atm	k _{1a} 1/s	k ₁ 1/s	k ₂ 1/s	SSE
Laju Alir 1 L/menit	0,0925	0,0002	0,1020	0,0954	0,0045
Laju Alir 0,8 L/menit	0,0432	0,0001	0,0947	0,0991	0,0274
Laju Alir 0,5 L/menit	0,0089	0,0013	0,0999	0,0947	0,0171
Perbandingan Air : Resin = 1:2	0,0140	0,3942	0,1000	0,1000	0,0166
Perbandingan Air : Resin = 1:3	0,0301	0,0005	0,0999	0,0984	0,1500

Pada suatu proses heterogen, proses kecepatan yang dipelajari akan melibatkan transfer massa dan reaksi kimia. Konsep bilangan Hatta adalah suatu cara yang dikembangkan oleh Hatta dengan membandingkan antara kecepatan reaksi kimia dan kecepatan transfer massa.

Menurut Levenspiel [7], untuk reaksi order satu kriteria bilangan Hatta dapat dihitung menggunakan persamaan (15).

$$H_a = \sqrt{\frac{D_L k_r}{k_l^2}} \quad (15)$$

Tabel 3 menunjukkan hasil analisis terhadap nilai bilangan Hatta pada mekanisme yang berlangsung. Tempat terjadinya suatu reaksi dapat mengindikasikan suatu reaksi berlangsung cepat atau lambat. Kriteria bilangan Hatta yang dijadikan acuan menurut Levenspiel [7] adalah:

- H < 0,3 : reaksi terjadi di badan utama cairan (lambat)
- Ha > 3 : reaksi terjadi di lapisan film cairan (cepat)
- 0,3 < Ha < 3 : reaksi terjadi di lapisan film cairan dan di badan utama cairan

Perhitungan Teoritis Parameter Transfer Massa

Nilai koefisien transfer massa CO₂ di fase gas dapat dihitung secara teoritis. Kolom adsorpsi yang digunakan dalam penelitian didekati dengan perhitungan transfer massa untuk kolom bahan isian.

Persamaan (16) digunakan untuk menghitung analogi Chilton dan Colburn. Nilai koefisien transfer massa kemudian dihitung menggunakan persamaan (17). Hasil perhitungan koefisien transfer massa secara teoritis ditunjukkan pada Tabel 3.

$$J_D = \frac{0.4548}{\epsilon_p} N_{Re}^{-0.4069} \tag{16}$$

$$J_D = \frac{k_c}{v} N_{sc}^{2/3} \tag{17}$$

Pada Tabel 4 terlihat bahwa kesalahan perhitungan teoritis dibandingkan perhitungan numerik berkisar 11-32%. Nilai kesalahan tersebut diharapkan mampu memberikan

justifikasi bahwa hasil optimasi untuk penentuan parameter-parameter dalam pemodelan matematis yang diajukan benar.

Nilai koefisien transfer massa di lapisan film cair dianalisis secara empirik menggunakan pendekatan teori lapisan film. Persamaan (18) digunakan untuk menghitung nilai teoritisnya.

$$k_{la} = \frac{D_L}{\delta} \tag{18}$$

Pada penelitian ini, cairan yang digunakan pada fase diam. Sehingga dengan variasi laju alir nilai transfer massa di lapisan film cairnya tidak akan memberikan perbedaan yang signifikan.

Untuk menghitung nilai koefisien transfer massa di lapisan film cair secara teoritis digunakan data tebal lapisan film (δ) dari literatur. Pada saat cairan diam nilai δ yang diperoleh adalah 1 x 10⁻⁴ m, nilai δ tersebut akan berubah seiring dengan kecepatan pengadukan yang dilakukan.

Nilai difusivitas CO₂ di cairan pada suhu 25°C adalah 1,97 x 10⁻⁹ m²/s. Sehingga nilai k_{La} terhitung adalah 0,00118 1/s. Apabila dibandingkan dengan nilai k_{La} hasil optimasi, maka kesalahan rata-rata yang diperoleh adalah 7,92%.

Dengan kesalahan rata-rata yang diberikan untuk masing-masing parameter tersebut, model matematis yang disusun dapat digunakan sebagai alat untuk mendekati kejadian fisis yang terjadi dengan syarat bahwa asumsi-asumsi yang diambil pada saat penyusunan model dilakukan terpenuhi. Selanjutnya nilai-nilai dari parameter yang diperoleh dari hasil optimasi dapat digunakan untuk keperluan rancangan alat proses di lapangan.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Nilai Tahanan

Variabel	Tahanan transfer massa di lapisan film gas [1/(H·k _{Ga})]	Tahanan transfer massa di lapisan film cair [1/k _{La}]	Tahanan spesifik reaksi kimia [1/(k ₁ ·ε _L)]
Laju Alir 1 L/menit	360,36	5.000,00	78,43
Laju Alir 0,8 L/menit	771,61	10.000,00	84,47
Laju Alir 0,5 L/menit	3.745,32	769,37	80,08
Perbandingan Air : Resin = 1:2	2.380,95	2,54	60,61
Perbandingan Air : Resin = 1:3	1.107,42	2.000,00	80,08

Tabel 3. Hasil Perhitungan Nilai Bilangan Hatta

Variasi	Nilai Bilangan Hatta	Tempat Terjadi Reaksi
Laju Alir 1 L/menit	0,5491	Lapisan film cair dan badan utama cairan
Laju Alir 0,8 L/menit	1,0580	Lapisan film cair dan badan utama cairan
Laju Alir 0,5 L/menit	0,0836	Badan utama cairan
Perbandingan Air : Resin = 1:2	0,0003	Badan utama cairan
Perbandingan Air : Resin = 1:3	0,3622	Lapisan film cair dan badan utama cairan

Tabel 4. Perbandingan Nilai k_{Ga} Teoritis dan k_{Ga} Hasil Simulasi

Kondisi Operasi	k _{Ga} Teoritis mol/menit/m ³ /atm	k _{Ga} Hasil Simulasi mol/menit/m ³ /atm	Kesalahan %
Laju Alir 1 L/menit	0,1250	0,0846	32,28
Laju Alir 0,8 L/menit	0,1651	0,1846	11,81
Laju Alir 0,5 L/menit	0,1885	0,2081	10,42
Perbandingan Air:Resin = 1:2	0,1405	0,1017	27,61
Perbandingan Air:Resin = 1:3	0,1651	0,1846	11,81

KESIMPULAN

Model matematis telah disusun untuk mempelajari proses transfer massa antar fasa gas, cair dan padat dengan mengacu pada teori lapisan film. Model matematis yang disusun menunjukkan hasil *fitting* yang optimal dengan nilai SSE rata-rata 0,0431. Dari empat parameter yang dioptimasi, yang mengontrol adalah nilai k_La karena mempunyai nilai paling kecil. Nilai k_{Ga} (hasil simulasi) apabila dibandingkan dengan nilai k_{Ga} (hasil perhitungan) mempunyai kesalahan rata-rata 18,79%. Sedangkan nilai k_La hasil simulasi apabila dibandingkan dengan nilai k_La hasil perhitungan memberikan kesalahan 7,92%. Hasil dari nilai-nilai parameter yang dioptimasi tersebut dapat digunakan untuk proses rancangan alat.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini dilakukan dengan dukungan DIPA Balai Besar Bahan dan Barang Teknik (B4T). Penulis mengucapkan terimakasih kepada Gde Pandhe Wisnu Suyantara dan Andika Bayu atas saran dan masukannya pada penyusunan model matematis.

DAFTAR SIMBOL

$\epsilon_{S,L,G}$: *hold up* padatan (solid), cairan, dan gas
 δ : Tebal lapisan film [m]
a,b : konstanta empirik

A : CO₂
B : H₂CO₃
BM_C : Berat molekul HCO₃⁻ [g/mol]
C : HCO₃⁻
C _{μ} : Konsentrasi CO₂ pada saat *equilibrium* [mol/m³]
C _{μ max} : Konsentrasi CO₂ maksimum pada saat *equilibrium* [mol/m³]
C_{Ai} : Konsentrasi CO₂ pada *interface* [mol/m³]
C_{AL} : Konsentrasi CO₂ pada fasa cair [mol/m³]
C_{BL} : Konsentrasi H₂CO₃ pada fasa cair [mol/m³]
C_{CL} : Konsentrasi HCO₃⁻ pada fasa cair [mol/m³]
C_{CS} : Konsentrasi HCO₃⁻ pada permukaan padatan [mol/m³]
d : diameter kolom adsorpsi [m]
D_L : Difusivitas CO₂ di fase cair [m²/s]
H : Bilangan Hatta
J_D : Koefisien Chilton-Colbum
L : Tinggi kolom adsorpsi [m]
k_{1,2} : Tetapan laju reaksi 1, 2
k_{Ca} : Koefisien transfer massa HCO₃⁻ dari fasa cair ke padatan [mol/min/m³/atm]
k_{Ga} : Koefisien transfer massa volumetris CO₂ pada fasa gas [mol/min/m³/atm]
k_{La} : Koefisien transfer massa volumetris CO₂ pada fasa cair [mol/min/m³/atm]
K_L : Koefisien transfer massa gabungan [1/s]
k_r : Koefisien transfer massa pada saat reaksi kimia [mol/min/m³/atm]
N_A : Laju transfer massa CO₂

N_B : Laju transfer massa H_2CO_3
 N_C : Laju transfer massa HCO_3^-
 N_{Re} : Bilangan Reynold
 N_{SC} : Bilangan Schmidt
 P_{AG} : Transfer massa CO_2 dari badan gas
 P_{Ai} : Transfer massa CO_2 dari *interface* gas cair menuju badan cairan
 $-r_A$: Laju reaksi konsumsi CO_2 [mol/min]
 $-r_B$: Laju reaksi konsumsi H_2CO_3 [mol/min]
 v : kecepatan linier gas [m/min]
 Y_i : Fraksi gas i [%]

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abatzoglou, N. And Boivin, S., 2009, "A Review of Biogas Purification Processes, Biofuels, Bioproducts and Biorefining", Vol.33, pp. 42-71.
- [2] Dubois, L. and Thomas, D., 2010, Comparison of Various Alkaline Solutions for H_2S/CO_2 -Selective Absorption Applied to Biogas Purification, Chem. Eng. Technol, **33**, (10), pp.1601–1609.
- [3] Vijay, V.K., et.all., 2006, Biogas Purification and Bottling into CNG Cylinders : "Producing Bio-CNG from Biomass for Rural Automotive Applications", *The 2nd Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment* Bangkok, Thailand .
- [4] Mutiari, A., Wiratni and Mindaryani, A., 2012, "Enhancing CO_2 Adsorption Using Strong Base Anion Exchange Resin", *Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE)*, 19th, pp.1–6.
- [5] Wahyudi, B.S., and A.Prasetya., 2006, *Pemodelan Matematis dan Penyelesaian Numeris dalam Teknik Kimia*, Yogyakarta: ANDI.
- [6] Mutiari, A., Wiratni and Mindaryani, A., 2013, "Equilibrium in CO_2 Adsorption Using Strong Base Anion Exchange Resin", *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Kejuangan Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*, pp.F31–F35.
- [7] Fogler, S.H., 1987, Elements of Chemical Reaction Engineering, *Chemical Engineering Science*, 42(10), p.2493, Available at: <http://www.mendeley.com/research/elements-chemical-reaction-engineering-1/>, accessed April 25, 2013.
- [8] Levenspiel, O., 1999, *Chemical Reaction Engineering* 3rd ed., New York: John Wiley & Sons.
- [9] Crittenden, B. & W, J.T., 1998, *Adsorption Technology and Design*, New York: Elsevier Science and Technology Books.