



Pengaruh Suhu Terhadap Sifat Sifat Gas-Cairan pada Absorpsi CO₂ Menggunakan a-MDEA

Temperature Effect Study on Gas-Liquid Properties of CO₂ Absorption Process with a-MDEA

Zulfakri Achir¹, Darmadi², Adisalamun^{2,*}

¹Program Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

²Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jalan Tgk. Syech Abdul Rauf No.7, Darussalam, Banda Aceh, Indonesia

*E-mail: adisalamun@che.unsyiah.ac.id

Terima draft: 14 Desember 2017; Terima draft revisi: 1 Maret 2018; Disetujui: 12 Maret 2018

Abstrak

Kecepatan transfer massa dan panas antara gas dan cairan sepanjang kolom absorpsi merupakan dasar dari proses perhitungan absorpsi CO₂ dari gas sintesa menggunakan pelarut Methyl Diethanol Amine (MDEA) dan aktivator Piperazine atau dikenal dengan a-MDEA. Model transfer massa dan reaksi kimia yang terjadi disusun secara matematis dari neraca massa dan neraca panas gas cair sepanjang kolom berdasarkan teori dua lapisan film (*two-film theory*) dengan pendekatan *overall rate transfer*. Sifat sifat campuran gas-cairan yang diperlukan dalam perhitungan diestimasi dari sifat-sifat individu gas dan cairan menggunakan konsep *mixing rules*. Estimasi sifat sifat campuran gas-cairan dilakukan dalam modul *sub-function* yang dibangun dengan *code programming*. Verifikasi modul sub-function dilakukan dengan membuat perbandingan antara sifat-sifat gas-cairan dari referensi dengan sifat-sifat gas-cair hasil estimasi yang merupakan output dari sub-function yang sudah disusun. Variabel yang berpengaruh langsung terhadap perubahan sifat-sifat campuran gas-cair adalah suhu. Terjadinya perubahan suhu akan mengakibatkan berubahnya sifat-sifat gas-cair. Berdasarkan hasil estimasi didapat bahwa meningkatnya suhu gas membuat berat molekul, difusivitas, dan viskositas campuran gas akan meningkat. Sebaliknya untuk koefisien transfer massa CO₂ dari fase gas ke interface gas-cair, akan semakin turun dengan meningkatnya suhu. Untuk densitas campuran gas, nilainya berbanding terbalik dengan suhu dan berbanding lurus dengan berat molekul campuran gas. Dari hasil estimasi didapat bahwa meningkatnya suhu gas akan membuat berat molekul campuran gas meningkat dan mengakibatkan densitas campuran gas juga meningkat. Sementara untuk sifat-sifat cairan, nilainya relatif tidak berubah karena suhu cairan relatif tetap. Perbedaan antara suhu cairan masuk di puncak menara dengan suhu cairan keluar di dasar menara hanya sekitar 1 K. Perbedaan suhu ini tidak signifikan untuk merubah sifat-sifat fisis cairan.

Kata kunci: absorpsi CO₂, a-MDEA, pengaruh suhu, *piperazine*, sifat gas-cair

Abstract

Mass and heat transfer rates between gases and liquids along the absorption column are the basis of the calculation process of CO₂ absorption from synthesis gas using Methyl Diethanol Amine (MDEA) solvent with Piperazine activator (also known as an a-MDEA). The mass transfer model and the chemical reactions occurring are mathematically arranged from the mass balance and the liquid gas heat balance along the column based on the two-film theory with the overall rate transfer approach. Properties of gas and liquid mixtures required in the calculations, estimated from the individual of liquid gas using the concept of mixing rules. Estimation of liquid gas mixture properties is performed in sub-function modules built with code programming. Verification of the sub-function module is done by making a comparison between the liquid gas properties of the literature and the estimation properties that are the outputs of the sub-functions that have been prepared. Variable that directly affects the properties change of liquid gas mixture is temperature. The occurrence of temperature changes will result in changing the value of gas and liquid properties. Based on the estimation result, it is found that the increase of gas temperature will make molecular weight, diffusivity, and viscosity of gas mixture increased. In contrast, the CO₂ mass transfer coefficient of the gas phase to the gas liquid interface decreases with increasing temperature. For the density of the gas mixture, the value is inversely proportional to the temperature and directly proportional to the molecular weight of the gas mixture. Based on the estimation results obtained, it seems that the increase in gas temperature make the molecular weight of the gas mixture increased and also resulted in the density of the gas mixture increased. As for the liquid properties, the value is relatively unchanged because the liquid temperature is relatively

fixed. The difference between the temperature of the liquid entering at the top of the tower with the temperature of liquid out at the base of the tower is only about 1 K. This temperature difference is not significant to change the value of liquid properties.

Keywords: CO₂ absorption, a-MDEA, gas-liquid properties, influence of temperature, piperazine

1. Pendahuluan

Absorpsi merupakan suatu teknik pemisahan gas dengan cara mengkontakkan campuran gas dengan suatu cairan *non volatile* sehingga terjadi proses perpindahan komponen gas dari lapisan film gas melewati interface gas-cair dan masuk ke dalam lapisan cairan (Kohl & Nielsen, 1997). Secara mekanisme proses yang terjadi dapat berupa transfer massa saja atau transfer massa yang diikuti dengan reaksi kimia. Dari berbagai metode pemisahan CO₂, hanya *chemical absorption* yang efektif digunakan untuk pabrik kimia (Wu, dkk., 2014).

Proses perhitungan pada absorpsi gas cair yang diikuti dengan reaksi kimia (*chemical absorption*) didasarkan pada kecepatan transfer massa dan panas antara gas dan cairan di sepanjang kolom absorpsi. Neraca massa dan panas diturunkan menggunakan persamaan kecepatan transfer melewati *interface* berdasarkan teori dua lapisan film (*two-film theory*) dengan pendekatan *overall rate transfer* (Norouzbahari, dkk., 2015). Pada interface gas-cair diasumsikan terjadi kesetimbangan termodinamika, sedangkan dalam lapisan cairan terjadi kesetimbangan kimia (Bolh r-Nordenkamp, dkk., 2004).

Keakuratan estimasi besaran transfer massa di lapisan film gas dan cairan merupakan hal yang sangat penting dalam merancang alat absorpsi di pabrik kimia (Bolh r-Nordenkamp, dkk., 2004). Estimasi besaran transfer massa membutuhkan sifat sifat fisis campuran gas dan cairan seperti difusivitas, viskositas, densitas, konduktivitas panas, dan surface tension (Khan, dkk., 2011). Sifat sifat campuran gas dan cairan secara langsung dipengaruhi oleh suhu, tekanan sistem, dan komposisi komponen penyusunnya.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh perubahan suhu terhadap sifat-sifat campuran gas dan cairan sepanjang kolom absorpsi. Perubahan suhu sepanjang kolom absorpsi didapat dari hasil perhitungan neraca massa dan panas komponen gas dan cairan.

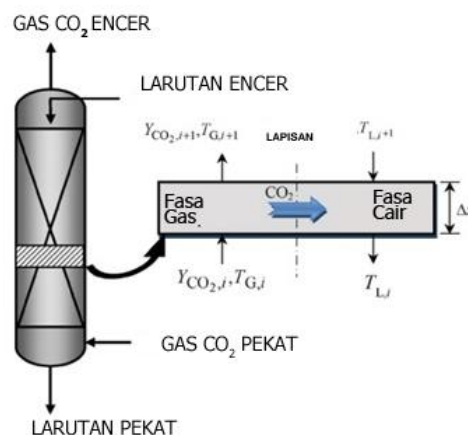
2. Metodologi

2.1. Bahan dan Alat

Artikel ini merupakan hasil penelitian simulasi yang mengembangkan persamaan dari proses Teknik kimia menggunakan software komputer program Matlab. Proses yang terlibat adalah absorpsi, perpindahan panas, dan reaksi antara gas.

2.2. Rancangan Proses

Sepanjang kolom absorpsi terjadi kontak antara gas dan cairan yang melewati packing. Proses perpindahan massa, panas, dan reaksi antara gas dan cairan dimodelkan dengan membuat elemen volume setebal Δz seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Absorpsi CO₂ pada Kolom Isian (Khan, dkk., 2011)

Pada kondisi *steady-state* dapat disusun model matematis perubahan komponen gas-cair sepanjang kolom absorpsi. Dalam penyusunan model matematis, diasumsikan aliran bersifat *plug flow* sehingga transfer massa dan panas ke arah radial dapat diabaikan. Basis perhitungan yang digunakan adalah basis mol gas bebas CO₂ (dY_A) karena dianggap hanya CO₂ yang mendifusi dari fase gas ke fase cair. Untuk kecepatan transfer massa dan kecepatan reaksi didekati dengan *overall rate transfer*, r_A''' (Levenspiel, 1999). Hasil penurunan neraca massa dan panas pada elemen volum setebal Δz dengan basis perhitungan gas bebas A dapat dilihat pada Pers. (1) sampai dengan Pers. (3). Sedangkan *overall rate*

transfer yang menghubungkan kecepatan transfer massa individual CO₂ di fase gas dan cair dengan kecepatan reaksi CO₂ di fase cair dapat dilihat pada Pers. (5).

$$\frac{dY_A}{dz} = -\frac{a_w S}{G'} r''_A \quad (1)$$

$$\frac{dT_G}{dz} = \frac{h_G a_w S}{G C_{pG}} (T_L - T_G) \quad (2)$$

$$\frac{dT_L}{dz} = \frac{a_w S}{L C_{pL}} \{h_G (T_L - T_G) - r''_A \Delta H_{abs}\} \quad (3)$$

$$n_{G,tot} = n_{G,n-A} (Y_A + 1) \quad (4)$$

$$r''_A = \frac{1}{\frac{1}{k_{Ag}a} + \frac{H_A}{k_{Al}aE}} P_A \quad (5)$$

Keterangan:

- G' : massa total campuran gas bebas CO₂, [kmol/s]
 a_w : luas permukaan *packing* yang dibasahi cairan/*volume packing*, [m²/m³]
 S : luas tampang kolom, [m²]
 : kecepatan transfer massa CO₂ per luas muka kontaktor, [kmol/(s.m²)].
 T_G : suhu gas, [K]
 T_L : suhu cairan, [K]
 G : massa total campuran gas, [kmol/s]
 C_{pG} : kapasitas panas gas [J/(kmol.K)]
 h_G : koefisien konveksi gas-cair, [J/(s.m².K)].
 L : massa total cairan, [kmol/s]
 C_{pL} : kapasitas panas cairan, [J/(kmol.K)]
 H_{abs} : panas penyerapan *solute*, [J/kmol]
 n_{G,tot} : massa total campuran gas, [kmol/s]
 n_{G,n-A} : massa total campuran gas bebas CO₂, [kmol/s]
 Y_A : fraksi mol CO₂ (A) terhadap gas bebas CO₂, [kmol A/kmol gas non A].
 k_{Ag}a : koefisien transfer massa CO₂ di lapisan film gas per volume kontaktor, [kmol/(s.m³contactor.bar)]
 k_{Al}a : koefisien transfer massa CO₂ di lapisan film cairan per volume kontaktor, [m³liquid/(m³contactor.s)]
 P_A : tekanan parsial CO₂ di badan utama gas, [bar]
 E : *Enhancement factor*
 H_A : konstanta Henry [(bar.m³liquid)/kmol]

Dari penyusunan model matematis, dihasilkan persamaan differensial biasa (*ordinary differential equation/ODE*) simultan dengan kondisi awal diketahui (*initial value problem*). Penyelesaian ODE dilakukan secara numeris dengan membuat code program MATLAB. Algoritma program disusun menggunakan penyelesaian numeris dengan metode *Runge-Kutta* (Riggs, 1988). *Initial value* untuk ODE simultan adalah suhu gas, suhu cairan, dan fraksi massa CO₂ pada fase gas di dasar menara (z=0). Dari iterasi *Runge-Kutta* akan terhitung suhu gas,

suhu cairan, dan fraksi massa CO₂ pada increment volume berikutnya.

Estimasi sifat sifat campuran gas-cair dilakukan dengan membuat modul *sub-function* yang dibangun dengan *code programming*. Variabel input untuk *sub-function* adalah suhu gas, suhu cairan, dan fraksi massa CO₂ yang didapat dari iterasi *Runge-Kutta*, ditambah dengan sifat sifat individual komponen penyusun gas dan cairan. Variabel output dari *sub-function* ini adalah hasil perhitungan sifat-sifat gas-cairan.

2.3. Model Matematis Properties Gas Cair

Untuk campuran cairan, properties fisis seperti difusivitas, viskositas, densitas, konduktivitas panas, dan surface tension, sudah banyak dimodelkan dari hasil eksperimen oleh para peneliti. Namun pemodelan untuk campuran gas masih sedikit sekali sehingga harus di estimasi dari teori kinetika gas dan transport properties.

a. Equation of State (EOS)

Model equation of state (EOS) digunakan untuk menghitung volume molar campuran gas; *mass velocity gas*; densitas campuran gas; dan *vapor pressure*. Dalam industri kimia, EOS yang populer digunakan adalah *Soave-Redlich-Kwong* dan *Peng-Robinson* (Gmehling, dkk., 2012). Dalam studi ini digunakan EOS *Soave-Redlich-Kwong* (SRK). Hubungan PVT dalam EOS *Soave-Redlich-Kwong* adalah seperti yang dideskripsikan oleh Pers. (6)

$$P = \frac{RT}{v_{mix} - b} - \frac{a}{v_{mix}(v_{mix} + b)} \quad (6)$$

Nilai a dan b untuk campuran gas dihitung dengan konsep *mixing rules* yang mengkorelasikan nilai a dan b komponen murni dengan fraksi mol komponen di fase gas dan sifat fisis individual komponen. *Mixing rules* yang umum digunakan adalah seperti terlihat pada Pers. (7) dan (8) (Finlayson, 2006):

$$a = \left(\sum_{i=1}^{N_{comp}} y_i a_i^{0.5} \right)^2 \quad (7)$$

$$b = \sum_{i=1}^{N_{comp}} y_i b_i \quad (8)$$

$$a_i = 0,42748 \frac{R^2 T_{ci}^2}{P_{ci}} \alpha_i \quad (9)$$

$$b_i = 0,08664 \frac{RT_{ci}}{P_{ci}} \quad (10)$$

$$a_i = \left[1 + (0,48 + 1,57\omega_i - 0,17\omega_i^2) \left(1 - T_{ri}^{0,5} \right) \right]^2 \quad (11)$$

$$T_{ri} = \frac{T}{T_{ci}} \quad (12)$$

Keterangan:

P : Tekanan [atm]

T : Suhu [K]

R : Konstanta gas

V_{mix} : specific volume gas [m³/kmol]

y_i : fraksi mol komponen

T_{ci} : suhu kritis [K]

P_{ci} : tekanan kritis [atm]

Ω : accentric factor

b. Berat Molekul

Berat molekul (M_{mix}) campuran gas atau cairan dihitung dengan persamaan yang menghubungkan fraksi mol dengan berat molekul individual komponen.

$$M_{mix} = \sum_{i=1}^{N_{comp}} x_i M_i \quad (13)$$

Keterangan:

M_{mix} : berat molekul campuran gas/cairan [kg/kmol]

M_i : berat molekul komponen [kg/kmol]

x_i : fraksi mol komponen

c. Densitas

Densitas gas diestimasi dari volume spesifik campuran gas yang dihitung dengan *equation of state* (Ahmad, 2010).

$$\rho_G = \frac{M_{mix}}{V_{mix}} \quad (14)$$

Densitas campuran air, piperazine (PZ), dan MDEA, di estimasi dari data hubungan densitas pada berbagai suhu (T_L), konsentrasi piperazine (C_{PZ}), dan konsentrasi MDEA (C_{MDEA}). Estimasi dilakukan dengan menggunakan interpolasi 3 dimensi terhadap data hubungan densitas dengan parameter T_L , C_{PZ} , dan C_{MDEA} (Derks, 2006).

d. Difusivitas

Koefisien difusivitas gas A dalam campuran gas dihitung dengan aturan Blanc (*Blanc's law*). Aturan Blanc merupakan penyederhanaan dari persamaan Stefan-Maxwell untuk solute dalam campuran gas homogen (Reid, dkk., 1987). Persamaan dalam aturan Blanc merupakan fungsi dari koefisien difusivitas A terhadap gas bukan A dalam campuran gas yang ditunjukkan menurut Pers. (15).

$$D_{i,m} = \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{x_j}{D_{i,j}} \right)^{-1} \quad (15)$$

Sedangkan koefisien difusivitas campuran gas biner ($D_{i,j}$) diestimasi menggunakan persamaan *Chapman & Enskog* (Reid, dkk., 1987)

$$D_{i,j} = \frac{0,00266 T^{3/2}}{P (M_{i,j})^{1/2} (\sigma_{i,j})^2 \Omega_D} \quad (16)$$

$$M_{i,j} = 2 \left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right)^{-1} \quad (17)$$

$$\sigma_{i,j} = \left(\frac{\sigma_i + \sigma_j}{2} \right) \quad (18)$$

$$\Omega_D = \frac{A}{(T^*)^B} + \frac{C}{\exp(DT^*)} + \frac{E}{\exp(FT^*)} + \frac{G}{\exp(HT^*)} \quad (19)$$

$$T^* = \frac{T}{\varepsilon_{i,j,k}} \quad (20)$$

$$\frac{\varepsilon_{i,j}}{k} = \left(\frac{\varepsilon_i \varepsilon_j}{k k} \right)^{1/2} \quad (21)$$

Keterangan:

$D_{i,m}$: koefisien difusivitas komponen i terhadap dalam campuran gas, [m²/hr]

$D_{i,j}$: koefisien difusivitas komponen i terhadap komponen j, [m²/hr]

T : suhu, [K]

P : tekanan, [bar]

$M_{i,j}$: berat molekul spesifik komponen i dan j

σ : characteristic length, [Å]

Ω_D : *diffusion collision integral*, tidak berdimensi

ε/k : koefisien *Lennard-Jones*

Parameter A sampai dengan H pada Pers. (19) adalah konstanta persamaan yang nilainya dapat dilihat pada Tabel 1. Difusivitas CO₂ dan piperazine (PZ) dalam cairan dihitung dengan Pers. (22) dan Pers. (23)

$$D_{CO_2} = 5,07 \cdot 10^{-6} \exp\left(\frac{-2371}{T}\right) \quad (22)$$

$$\ln(D_{PZ}) = -13,672 + \frac{-2160,9}{T} - 19,23 e^{-5} C_{PZ} \quad (23)$$

Keterangan:

D_{CO_2} : koefisien difusivitas CO₂ dalam cairan, [m²/hr]

$D_{i,j}$: koefisien difusivitas Piperazine dalam cairan, [m²/hr]

e. Viskositas

Viskositas campuran gas diestimasi menggunakan teori multikomponen *Chapman & Enskog* (Bird, dkk., 2002)

$$\mu_{G,mix} = \sum_{\alpha=1}^{Ncomp} \frac{(x_{\alpha})(\mu_{\alpha})}{\sum_{\beta}(x_{\beta})(\phi_{\alpha\beta})} \quad (24)$$

$$\phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_{\alpha}}{M_{\beta}} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_{\alpha}}{\mu_{\beta}} \right)^{0,5} \left(\frac{M_{\beta}}{M_{\alpha}} \right)^{0,25} \right]^2 \quad (25)$$

Viskositas gas murni (μ_i) diestimasi dengan Pers. (26) yang menghubungkan berat molekul (M) dengan parameter *Lennard-Jones* (Reid, dkk., 1987).

$$\mu_i = 2,6693 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega_{\mu}} \quad (26)$$

$$\Omega_{\mu} = A(T^*)^{-B} + C \exp(-DT^*) + E \exp(FT^*) \quad (27)$$

$$T^* = \frac{T}{(\varepsilon/k)_i} \quad (28)$$

Keterangan:

μ_G : viskositas gas murni, [gr/cm.s]

Ω_{μ} : *collision integral for viscosity*, tidak berdimensi

Parameter A sampai dengan F pada Pers. (27) adalah konstanta persamaan yang nilainya dapat dilihat pada Tabel 1. Estimasi viskositas campuran cairan dilakukan dengan menggunakan interpolasi 3 dimensi terhadap data hubungan viskositas dengan parameter suhu cairan (T_L), konsentrasi Piperazine (C_{PZ}), dan konsentrasi MDEA (C_{MDEA}).

Tabel 1. Konstanta Persamaan Chapman & Enskog untuk Difusivitas dan Viskositas Gas

Parameter	Konstanta Difusivitas Gas	Konstanta Viskositas Gas
A	1,06036	1,16145
B	0,15610	0,14874
C	0,19300	0,52487
D	0,47635	0,77320
E	1,03587	2,16178
F	1,52996	2,43787
G	1,76474	-
H	3,89411	-

2.4. Konstanta kecepatan transfer massa gas dan cair

Koefisien transfer massa A dari badan utama gas ke interface gas-cair dalam kolom absorpsi dengan susunan tumpukan *random packing* diestimasi dengan Pers. (29) yang telah dikorelasikan oleh Onda dkk (Norouzbahari, dkk., 2015).

$$\frac{k_G RT}{a_t D_G} = C_1 \left(\frac{G}{a_t \mu_G} \right)^{0,7} \left(\frac{\mu_G}{\rho_G D_G} \right)^{1/3} (a_t d_p)^{-2} \quad (29)$$

Keterangan:

k_G : koefisien transfer massa fase gas, [kmol/(s.m².bar)]

R : konstanta gas ideal [83,144 × 10⁻³ (m³.bar)/(s.m².bar)]

G : kecepatan massa gas [kg/(s.m²)]

T : suhu campuran gas [K]

D_G : difusivitas campuran gas, [m²/s]

μ_G : viskositas campuran gas, mPa.s [kg/(s.m)]

ρ_G : densitas campuran gas, [kg/m³]

a_t : luas permukaan *packing/volume packing*, [m²/m³]

d_p : diameter *packing*, [m]

C_1 : konstanta tumpukan *packing*

Sedangkan transfer massa A dari interface gas-cair ke badan utama cairan diestimasi dengan Pers. (30). Persamaan ini merupakan persamaan tidak berdimensi yang telah dikorelasikan oleh Onda dkk (Norouzbahari, dkk., 2015).

$$k_L \left(\frac{\rho_L}{\mu_L g} \right)^{1/3} = 0,0051 \left(\frac{L}{a_w \mu_L} \right)^{2/3} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_L} \right)^{1/2} (a_t d_p)^{2/5} \quad (30)$$

Keterangan:

k_L : koefisien transfer massa fase cair, [m³liquid/m²surface.s]

L : kecepatan massa cairan, [kg/(s.m²)]

D_L : difusivitas cairan, [m²/s]

μ_L : viskositas cairan, mPa.s, (cP)

ρ_L : densitas cairan, [kg/m³]

a_w : *wetted surface of the packing*

Luas permukaan packing yang dibasahi oleh cairan a_w , diestimasi dengan persamaan Onda (Norouzbahari, dkk., 2015)

$$\frac{a_w}{a_t} = 1 - \exp \left[-1,45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma} \right)^{0,75} N_{Re}^{0,1} N_{Fr}^{-0,05} N_{We}^{0,2} \right] \quad (31)$$

$$N_{Re} = \frac{L}{a_t \mu_L} \quad (32)$$

$$N_{Fr} = \frac{L^2 a_t}{\rho_L g} \quad (33)$$

$$N_{We} = \frac{L^2}{\rho_L \sigma a_t} \quad (34)$$

Keterangan:

σ_c : *critical surface tension of the packing*, nM/m, [dyne/cm]

σ : *surface tension of liquid*, nM/m, [dyne/cm]

N_{Re} : Bilangan *Reynold*

N_{Fr} : Bilangan *Froude*

N_{We} : Bilangan *Weber*

2.5. Modul Program dan Verifikasi

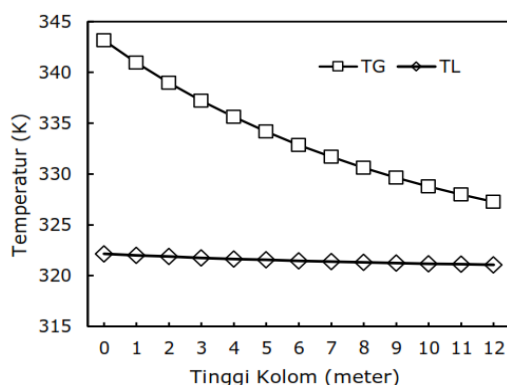
Seluruh perhitungan estimasi sifat fisis dilakukan dalam modul sub-function yang

dibangun dengan *code programming*. Variabel *input sub-function* adalah variabel iterasi untuk *Runge-Kutta* seperti suhu gas, suhu cairan, dan fraksi massa CO₂ dan ditambah dengan sifat sifat individual komponen penyusun gas dan cairan seperti *Lennard Jones Potensial*, data fisis komponen, data kritis komponen, dan konstanta persamaan kapasitas panas. Sedangkan variabel output adalah hasil perhitungan sifat sifat gas-cairan. Verifikasi modul *sub-function* dilakukan dengan membuat perbandingan antara data sifat fisis hasil eksperimen yang telah dipublikasikan (Bird, dkk., 2002) (Gmehling, dkk., 2012) (Perry, 2008) (Reid, dkk., 1987) dengan output sifat fisis dari *sub-function* yang sudah disusun.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Estimasi Sifat Fisis Campuran

Estimasi sifat fisis campuran gas dan cairan sepanjang absorber terhadap suhu dan tinggi kolom absorpsi yang dilakukan adalah viscositas, difusivitas, densitas, *flow mass*, berat molekul, kapasitas panas, konduktivitas panas, dan koefisien transfer panas gas-cairan. Selain itu juga diestimasi koefisien transfer massa individual fase gas dan koefisien transfer massa individual fase cair, serta konstanta Henry CO₂ dalam cairan.



Gambar 2. Hubungan suhu gas dan cairan terhadap ketinggian kolom absorpsi

Dalam pemodelan, perhitungan *increment* $z=0$ dimulai dari bawah kolom absorpsi. Gas masuk dari bawah kolom absorpsi pada suhu 343 K (70°C). Sedangkan cairan yang terdiri dari Air, Piperazine (PZ), dan MDEA masuk dari bagian atas kolom absorpsi. Dalam pemodelan dilakukan *trial and error* dengan menentukan suhu cairan keluar dari kolom absorpsi (*increment* $z=0$). Hasil dari *trial and error* akan diperoleh suhu cairan masuk

ke kolom absorpsi. Hasil *trial and error* dianggap benar jika suhu cairan masuk mendekati suhu desain kolom absorpsi PT Pupuk Iskandar Muda yang digunakan sebagai referensi, yaitu sekitar 48°C (321,15 K).

Hasil simulasi perubahan suhu gas dan cairan sepanjang kolom absorpsi ditampilkan pada Gambar 2. Dari Gambar 2 terlihat semakin tinggi kolom absorpsi, semakin turun suhu gas. Terjadinya penurunan suhu gas sepanjang kolom absorpsi karena adanya perpindahan panas dari gas ke cairan yang mengalir turun dari atas kolom absorpsi. Sedangkan untuk cairan, perubahan suhunya terlihat tidak signifikan. Hal ini disebabkan oleh massa cairan yang masuk ke kolom absorpsi sangat besar dibandingkan dengan massa CO₂ yang mendifusi ke dalam cairan. Kecepatan cairan masuk ke kolom absorpsi adalah sebesar 720510 kg/hr (7,38 kmol/s) atau sekitar 200 L/s jika dianggap densitas cairan adalah sebesar 1018 kg/m³. Sementara massa CO₂ dalam aliran gas masuk ke kolom absorpsi adalah sebesar 0,39 kmol/s sehingga panas absorpsi CO₂ tidak signifikan untuk menaikkan suhu cairan.

3.2. Hubungan Suhu dengan Sifat Fisis Gas

Terjadinya perubahan suhu gas sepanjang kolom absorpsi menyebabkan sifat fisis gas juga ikut berubah. Hasil estimasi perubahan sifat sifat fisis gas seperti densitas, berat molekul, difusivitas, viscositas, dan koefisien transfer massa individual fase gas terhadap suhu gas sepanjang kolom absorpsi dapat dilihat pada Tabel 2. Densitas campuran gas dipengaruhi oleh suhu dan komposisi komponen penyusun-nya. Secara termodinamika, densitas campuran gas dapat diestimasi dari persamaan *gas real* (Smith, dkk., 2001) seperti yang terlihat pada Pers. (35).

$$\rho = \frac{MP}{zRT} \quad (35)$$

Dari Persamaan (35) terlihat bahwa densitas gas berbanding terbalik dengan suhu (T) dan berbanding lurus terhadap berat molekul gas (M). Untuk campuran gas dengan komposisi tidak berubah, kenaikan suhu menyebabkan densitas campuran gas semakin kecil. Namun pada suhu tetap, kenaikan jumlah fraksi mol komponen yang memiliki berat molekul yang besar menyebabkan berat molekul campuran gas menjadi lebih besar yang mengakibatkan

Tabel 2. Hubungan suhu gas dengan sifat sifat campuran gas pada berbagai ketinggian kolom absorpsi

Tinggi Kolom (m)	Suhu (K)	Berat Molekul (kg/kmol)	Densitas (kg/m ³)	Kecepatan Massa (kg/m ² .s)	Difusivitas [m ² /s]	Viskositas (kg/m.s)	Koefisien Transfer Massa (kmol/s.m ² .bar)
9,7	329	9,81	11,47	2,29	$1,37 \times 10^{-6}$	$16,38 \times 10^{-6}$	0,4455277
7,6	331	10,6539	12,387	2,55	$1,42 \times 10^{-6}$	$16,60 \times 10^{-6}$	0,3556071
5,8	333	11,5129	13,317	2,83	$1,47 \times 10^{-6}$	$16,79 \times 10^{-6}$	0,2861652
4,4	335	12,2743	14,13	3,09	$1,52 \times 10^{-6}$	$16,96 \times 10^{-6}$	0,23854973
3,1	337	13,0521	14,95	3,37	$1,58 \times 10^{-6}$	$17,11 \times 10^{-6}$	0,1998306
1,9	339	13,8267	15,76	3,66	$1,64 \times 10^{-6}$	$17,26 \times 10^{-6}$	0,1688186
0,9	341	14,5097	16,45	3,93	$1,69 \times 10^{-6}$	$17,39 \times 10^{-6}$	0,1463110
0	343	15,1502	17,10	4,19	$1,75 \times 10^{-6}$	$17,51 \times 10^{-6}$	0,1284858

Tabel 3. Hubungan suhu cairan dengan sifat sifat fisis cairan pada berbagai ketinggian kolom absorpsi

Tinggi Kolom (m)	Suhu (K)	Konsentrasi Piperazine (kmol/m ³)	Konsentrasi MDEA (kmol/m ³)	Densitas (kg/m ³)	Viskositas (kg/m.s)	Koefisien Transfer Massa (m ³ liquid/m ² surface.s)
9,0	321,20	0,5917	2,9942	1019,4	$2,39 \times 10^{-3}$	$1,8856 \times 10^{-3}$
6,2	321,40	0,5916	2,9937	1019,3	$2,36 \times 10^{-3}$	$1,8811 \times 10^{-3}$
4,1	321,60	0,5916	2,9932	1019,1	$2,36 \times 10^{-3}$	$1,8777 \times 10^{-3}$
2,4	321,80	0,5915	2,9928	1018,9	$2,36 \times 10^{-3}$	$1,8755 \times 10^{-3}$
0,9	322,01	0,5914	2,9923	1018,8	$2,36 \times 10^{-3}$	$1,8743 \times 10^{-3}$
0	322,15	0,5913	2,9919	1018,6	$2,37 \times 10^{-3}$	$1,8741 \times 10^{-3}$

densitas gas juga semakin besar. Berdasarkan teori kinetika gas, tumbukan antara partikel gas dipengaruhi oleh suhu. Semakin tinggi suhu gas, semakin cepat tumbukan antar partikel dan semakin besar transfer momentum yang menyebabkan semakin cepat massa gas menyebar dan memenuhi ruang sehingga nilai difusivitas gas akan meningkat (Bird, dkk., 2002). Demikian juga terhadap viskositas atau kekentalan gas seperti yang terlihat pada Tabel 2, nilai viskositas akan naik dengan meningkatnya suhu gas (Gmehling, dkk., 2012).

3.3. Hubungan Suhu dengan Sifat Fisis Cairan

Densitas dan viskositas cairan merupakan fungsi dari suhu dan senyawa organik yang terlarut. Pada suhu tetap, densitas dan viskositas cairan naik dengan bertambahnya jumlah senyawa yang terlarut. Sedangkan pada komposisi yang tidak berubah, densitas dan viskositas cairan akan turun dengan turunnya suhu cairan (Foo, dkk., 2015). Fenomena tersebut sesuai dengan data hasil estimasi densitas dan viskositas seperti yang ditampilkan pada

Tabel 3. Dari tabel tersebut terlihat bahwa pada komposisi Piperazine dan MDEA yang relatif tetap, meningkatnya suhu cairan akan membuat nilai densitas dan viskositas cairan cenderung menurun.

Dalam proses absorpsi, solut (CO₂) berpindah dari fase gas ke fase cair. Antara kedua fase tersebut, terdapat dua lapisan film yang dipisahkan oleh suatu interface. Lapisan film yang dekat dengan badan utama gas disebut dengan film gas, sedangkan yang dekat dengan badan utama cairan disebut dengan lapisan film cairan (Chattopadhyay, 2007).

Perpindahan massa solut dari fase gas ke cairan terjadi secara molekuler mengikuti teori dua lapisan film (*two film theory*). Menurut teori dua lapisan film, tahanan transfer massa hanya ada di fase gas dan cair, sedangkan di *interface* gas-cair tidak terdapat tahanan transfer massa. Pada kondisi *steady state*, konsentrasi solut dalam lapisan film di interface gas-cair akan berada dalam kesetimbangan (*equilibrium*) dengan konsentrasi *solute* dalam lapisan film cairan di *interface* gas-cair (deMontigny & Saskatchewan, 1998).

Tahanan transfer massa di lapisan film gas dan lapisan film cairan, berbanding terbalik dengan besarnya koefisien transfer massa (Chattopadhyay, 2007). Secara fundamental, koefisien transfer massa fase gas (k_G) merupakan fungsi dari sifat fisis fluida (*transport properties*) yang dinyatakan dalam bentuk bilangan Schmidt (N_{Sc}) dan hidrodinamika aliran fluida yang dinyatakan dengan bilangan Reynold (N_{Re}). Bilangan Schmidt (N_{Sc}) adalah fungsi dari viskositas, densitas, dan difusivitas gas, sementara bilangan Reynold (N_{Re}) merupakan fungsi dari kecepatan massa dan viskositas gas (Perry, 2008).

$$N_{Sc} = \frac{\mu_G}{\rho_G D_G} \quad (36)$$

$$N_{Re} = \frac{Gd}{\mu_G} \quad (37)$$

Sifat fisis pada Pers. (36) dan (37) yaitu densitas, viskositas, dan difusivitas campuran gas, merupakan variabel yang dipengaruhi oleh suhu. Terjadinya perubahan suhu akan mengakibatkan berubahnya sifat fisis campuran gas. Perubahan sifat fisis gas akan merubah nilai bilangan Schmidt (N_{Sc}) dan bilangan Reynold (N_{Re}) yang pada akhirnya akan ikut merubah nilai koefisien transfer massa. Hasil estimasi koefisien transfer massa fase gas ditampilkan pada Tabel 2. Dari Tabel 2 terlihat bahwa koefisien transfer massa fase gas semakin kecil dengan meningkatnya suhu. Sebaliknya pada suhu yang semakin rendah, koefisien transfer massa fase gas akan semakin besar.

Sebagaimana halnya koefisien transfer massa fase gas, koefisien transfer massa fase cair juga merupakan fungsi dari sifat fisis fluida, hidrodinamika aliran fluida, dan geometri *packing* (Perry, 2008). Sifat fisis cairan dipengaruhi oleh perubahan suhu sementara hidrodinamika aliran dipengaruhi oleh kecepatan massa cairan. Jika laju aliran massa cairan sepanjang kolom absorpsi dapat dianggap relatif tetap karena *pressure drop* kecil, maka koefisien transfer massa fase cair akan dipengaruhi langsung oleh perubahan suhu. Untuk suhu cairan yang relatif tidak berubah, maka besaran nilai koefisien transfer massa fase cair juga relatif tidak berubah. Kondisi ini sesuai dengan hasil estimasi koefisien transfer massa fase cair seperti yang terlihat pada Tabel 3.

4. Kesimpulan

1. Untuk campuran gas dengan komposisi tidak berubah, kenaikan suhu akan membuat densitas campuran gas semakin kecil. Namun pada suhu tetap, kenaikan jumlah fraksi mol komponen yang memiliki berat molekul yang besar akan membuat berat molekul campuran gas menjadi lebih besar dan mengakibatkan densitas gas juga semakin besar. Sedangkan difusivitas dan viskositas campuran gas akan naik dengan meningkatnya suhu dan turun ketika suhu gas juga turun.
2. Pada suhu tetap, densitas dan viskositas cairan akan naik dengan bertambahnya jumlah senyawa organik yang terlarut. Sedangkan pada komposisi yang tidak berubah, densitas dan viskositas cairan akan turun dengan turunnya suhu cairan.
3. Koefisien transfer massa fase gas semakin kecil dengan meningkatnya suhu. Sebaliknya pada suhu yang semakin rendah, koefisien transfer massa fase gas akan semakin besar.
4. Untuk suhu cairan yang relatif tidak berubah, maka besaran nilai koefisien transfer massa fase cair juga relatif tidak berubah.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada pimpinan PT. Pupuk Iskandar Muda yang telah memberikan data desain kolom absorpsi CO₂ sebagai data verifikasi model matematika.

Daftar Pustaka

- Ahmad, T. (2010) *Vapor-Liquid Phase Equilibria Calculations*, Elseiver, United State of America.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N. (2002) *Transport Phenomena*, 2nd, John Wiley & Sons, New York.
- Bolh r-Nordenkamp, M., Friedl, A., Koss, U., Tork, T. (2004) Modelling selective H₂S absorption and desorption in an aqueous MDEA-solution using a rate-based non-equilibrium approach, *Chemical Engineering and Processing*, 43, 701 – 715.

- Chattopadhyay, P. (2007) *Absorption & Stripping*, Asian Books Pvt, New Delhi.
- deMontigny, D., Saskatchewan, R. (1998) *Carbon Dioxide Absorption Studies Using Ultra-highly Concentrated Monoethanolamine Solutions*, Industrial System Engineering University of Regina, Regina - Canada.
- Derks, P. (2006) Carbon Dioxide Absorption in Piperazine Activated N-Methyldiethanolamine, *PhD thesis*, University of Twente, Netherlands.
- Finlayson, B. A. (2006) *Introduction to Chemical Engineering Computing*. Hoboken, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Foo, C. K., Leo, C. Y., Aramesh, R., Aroua, M. K., Aghamohammadi, N., Shafeeyan, M. S., Shamiri, A. (2015) Density and Viscosity of Aqueous Mixtures of N-Methyldiethanolamines (MDEA), Piperazine (PZ), and Ionic Liquid, *Jurnal of Molecular Liquids*, 209, 596 – 602.
- Gmehling, J., Kolbe, B., Kleiber, M., Rarey, J. (2012) *Chemical Thermodynamics for Process Simulation*, Wiley-VCH Verlag & Co. KgaA, Weinheim - Germany.
- Khan, F., Krishnamoorthi, V., Mahmud, T. (2011) Modelling reactive absorption of CO₂ in packed columns for post-combustion carbon capture applications, *Chemical Engineering Research and Design*, 1600 – 1608.
- Kohl, A. L., Nielsen, R. B. (1997) *Gas purification*, 5th ed., Gulf Publishing Company, Houston-Texas.
- Levenspiel, O. (1999) *Chemical Reaction Engineering*, John Wiley & Sons, New York.
- Norouzbahari, S., Shahhosseini, S., Ghaemi, A. (2015) CO₂ chemical absorption into aqueous solutions of piperazine: modeling of kinetics and mass transfer, *Natural Gas Science and Engineering*, 26, 1059 – 1067.
- Perry, R. H. (2008) *Perry's Chemical Engineer's Handbook*, 8ed., McGraw-Hill Companies, New York.
- Reid, R. C., Prausnitz, J. M., Polling, B. E. (1987) *The Properties of Gas and Liquids*, 4th ed., Mc Graw-Hill, New York.
- Riggs, J. B. (1988) *An Introduction to Numerical Methods For Chemical Engineers*, Texas Tech University Press, Texas.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbott, M. M. (2001) *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, 6th ed., McGraw-Hill Companies, New York.
- Wu, X., Yu, Y., Qin, Z., Zhanga, Z. (2014) The Advances of Post-Combustion CO₂ Capture with Chemical Solvents: Review and Guidelines, *Energy Procedia*, 63, 1339 – 1346.