



Pemodelan Dekomposisi *Ammonium Carbamate* pada Tekanan Tinggi di Pabrik Urea

Rahmat Sunarya¹, Wahyudi Budi Sediawan^{2*}, Muslikhin Hidayat²

¹Program Pascasarjana Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No.2 Yogyakarta, 55281, Indonesia

²Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No.2 Yogyakarta, 55281, Indonesia

*E-mail: wbsediawan@ugm.ac.id

Abstract

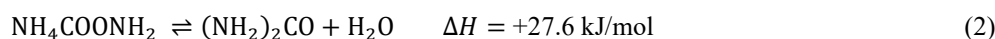
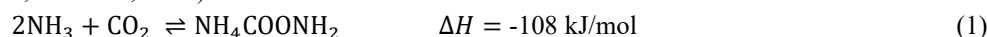
Urea acts as a nitrogen-based fertilizer to boost crop production and prevent a worldwide hunger crisis. Considering ways to make urea production in existing plants more environmentally friendly, a detailed study has been conducted on the high-pressure stripper, in which the equipment uses intensive energy to decompose ammonium carbamate. The mathematical model was prepared using the two-film theory. The UNIQUAC and Redlich-Kwong equations of state have been used to express nonideality in the NH₃-CO₂-H₂O-urea system under high pressure and temperature circumstances. Due to the lack of transport properties in extreme conditions, the properties were estimated using a theoretical method. The present study obtained the mass-transfer coefficient in dimensionless form $Sh_G = 0.0023Re_{LG}^{0.8840}Sc_G^{0.61}$ and $Sh_L = 0.25Re_L^{-0.2888}Sc_L^{0.47}$. Moreover, the heat-transfer coefficient was calculated using the Chilton-Colburn analogy. The proposed model result matches what is expected with the commercial plant data. Furthermore, with less than 5% relative deviations, the model deserves significant consideration for any practical use in high-pressure stripper simulation.

Keywords: urea synthesis; ammonium carbamate decomposition; falling film; mathematical modelling.

Pendahuluan

Urea merupakan salah satu pupuk sintetik berbasis nitrogen yang paling banyak digunakan dalam peningkatan produktivitas pertanian dan perkebunan (Heffer and Praud'homme, 2016). Hampir 50% populasi dunia ditopang oleh makanan bersumber dari pupuk (Erisman et al., 2008). Pada tahun 2050, populasi dunia akan bertambah sebanyak 2-3 milyar, sehingga berdampak pada peningkatan permintaan urea (Zhang et al., 2015). Oleh karena itu, studi komprehensif untuk keberlanjutan produksi urea perlu dilakukan.

Roule berhasil menemukan urea pertama kali di urin pada tahun 1773. Kemudian pada tahun 1828, Woehler sukses mensintesis urea dari amonia dan asam sianik (Mavrovic et al., 2000). Setelah proses pembuatan ammonia ditemukan oleh Haber-Bosch pada tahun 1913, urea disintesis secara komersil dari amonia dan karbon dioksida dengan reaksi Bazarov (Maxwell, 2004; Meessen, 2010):



dimana (NH₂)₂CO adalah urea dan NH₄COONH₂ adalah ammonium karbamat. Reaksi (1) berlangsung sangat cepat, eksotermis dan mencapai kesetimbangan sedangkan reaksi (2) berlangsung lambat dan endotermis.

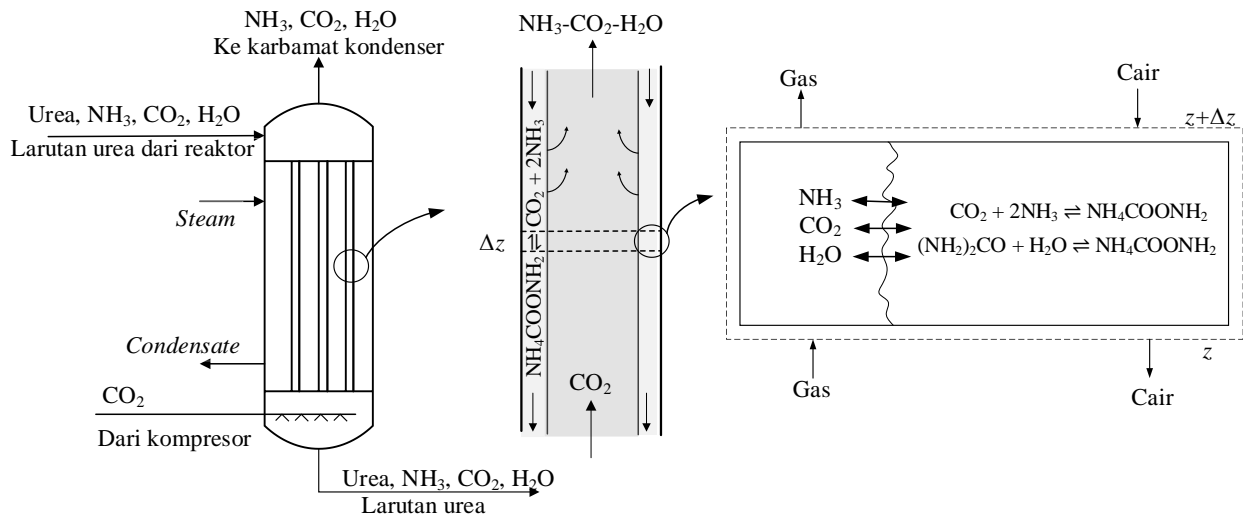
Konversi di reaktor urea (basis CO₂) umumnya berkisar 60-70% sehingga karbamat dan amonia yang tidak bereaksi perlu didekomposisi pada unit *stripper*. Proses dekomposisi dan daur ulang dilakukan pada tekanan sintesa, artinya proses *stripping* dilakukan pada tekanan tinggi (150-200 atm). Beberapa alasan dilakukan proses *stripping* pada tekanan sintesa yaitu tidak dibutuhkan ekstra air untuk mendaur ulang karbamat, tidak diperlukan unit *medium pressure recovery* bervolume besar, dan dapat diperoleh *steam* dari kondensasi campuran gas hasil *stripping* (Yubing, 2010). Semua alasan tersebut mengerucut kepada penurunan konsumsi energi pada produksi urea.

Metode Penelitian

Model dikembangkan dengan mempertimbangkan proses dekomposisi hanya terjadi pada fase cair. Reaksi (1) berlangsung sangat cepat dan mencapai kesetimbangan, karenanya proses transfer massa mendominasi proses *stripping*. Berlawanan dengan reaksi (1), reaksi (2) berlangsung sangat lambat, sehingga laju reaksi kimia yang



mendominasi. Pada fase gas, hanya terdapat komponen NH_3 , CO_2 , dan H_2O . Tekanan uap urea pada kondisi sintesa sekitar 0.004 atm (Voskov and Voronin, 2016). Jika dibandingkan dengan tekanan sintesa mencapai 150 atm, tekanan uap urea sangatlah rendah, sehingga praktis keberadaan urea pada fase gas dapat diabaikan.



Gambar 1. Skematik aliran pada *high pressure stripper* dan analisa kesetimbangan fase-kimia pada elemen volum

Persamaan neraca massa dan energi pada *falling film high pressure stripper* dianalisa berdasarkan elemen volume. Adapun persamaan yang diperoleh adalah sebagai berikut:

$$\frac{dL_i}{dz} = K_{G,i} a S (P^*_i - P_i) + \delta_i r S \quad (3)$$

$$\frac{dL_4}{dz} = r S \quad (4)$$

$$\frac{dG_i}{dz} = K_{G,i} a S (P^*_{\text{NH}_3} - P_{\text{NH}_3}) \quad (5)$$

$$\frac{dT_L}{dz} = \frac{-\sum_{i=1}^3 \frac{dG_i}{dz} \Delta H_{v,i} + U a S (T_s - T_L) - h a S (T_L - T_G) - \frac{dL_2}{dz} \Delta H_{R,1} - \frac{dL_4}{dz} \Delta H_{R,2}}{\sum_{i=1}^4 L_i C_{p,L,i}} \quad (6)$$

$$\frac{dT_G}{dz} = \frac{h a S (T_L - T_G)}{\sum_{i=1}^3 G_i C_{p,G,i}} \quad (7)$$

Dimana (i) merupakan komponen berturut-turut NH_3 (1), CO_2 (2), H_2O (3), dan urea (4). δ_i adalah koefisien reaksi. Nilai h pada pers. (7) dihitung dengan menggunakan analogi Chilton-Colburn (Chilton and Colburn, 1934). Persamaan laju reaksi (r) merupakan laju dekomposisi urea menjadi amonia dan karbon dioksida. Adapun persamaan laju reaksinya adalah (Aoki et al., 1999):

$$r = (6,25 \times 10^5 \text{ s}^{-1}) \exp\left(\frac{-87 \text{ kJ/mol}}{RT}\right) C_T x_4 S \quad (8)$$

Konsentrasi antarmuka (*interface*) dihitung dengan kesetimbangan fisik uap-cair (*vapor-liquid equilibrium*). Untuk NH_3 dan H_2O , aturan Lewis-Randall digunakan sebagai berikut:

$$x_{1,3} \gamma_{1,3} P_{1,3}^{\text{sat}} \exp\left(\frac{v_{1,3}^l P}{RT}\right) = P y_{1,3} \hat{\phi}_{1,3} \quad (9)$$

Untuk CO_2 , dimana temperatur kritisnya jauh dibawah temperatur sintesa, konstanta Henry CO_2 pada air murni digunakan, maka dapat dituliskan:

$$x_{\text{CO}_2} \gamma_{\text{CO}_2} H_{\text{CO}_2} \exp\left(\frac{v_2^l (P - P_3^{\text{sat}})}{RT}\right) = P y_2 \hat{\phi}_2 \quad (10)$$

Model termodinamika *extended-UNIQUAC* yang diusulkan oleh Isla (Isla et al., 1993) merupakan model yang paling banyak digunakan untuk menjelaskan ketidakidealan sistem $\text{NH}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -urea pada kondisi sintesa dan hidrolisa urea (Hamidipour et al., 2005; Rahimpour et al., 2010; Zendehboudi et al., 2014; Zhang et al., 2005). Model ini menjelaskan komponen ionik dan non-ionik pada sistem tersebut. Namun model ini kompleks, sehingga tidak praktis untuk digunakan dalam berbagai aplikasi. Dengan pertimbangan seperti itu, maka digunakan model UNIQUAC lebih sederhana yang diusulkan oleh Voskov dan Voronin (2016) untuk menghitung koefisien aktivitas (γ). Sedangkan untuk koefisien fugasitas ($\hat{\phi}$), persamaan keadaan Redlich-Kwong (RK) digunakan karena

keakuratan dan kesederhanaan model. Selain itu, model ini merupakan model terbaik diantara seluruh persamaan kubik dua parameter lainnya (Soave, 1993). Pada eksperimen di kondisi sintesa urea yang pernah dilakukan oleh Lemkowitz, model RK dapat menjelaskan dengan akurat untuk fase gas (Lemkowitz et al., 1973; Piotrowski et al., 1998).

Teori lapisan film digunakan untuk menjelaskan tahanan pada proses *stripping*, dimana tahanan perpindahan massa secara keseluruhan dapat dituliskan:

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L} \quad (11)$$

Karena ammonia sangat mudah larut dalam air dan memiliki konstanta Henry yang kecil, maka tahanan di fase cair dapat diabaikan (Levenspiel, 1999). Asumsi serupa diaplikasikan untuk air (Park, 2014), sehingga tahanan keseluruhannya dapat disajikan sebagai berikut:

$$K_{G,NH_3} \approx k_{G,NH_3} \quad (12)$$

$$K_{G,H_2O} \approx k_{G,H_2O} \quad (13)$$

Berbeda dengan ammonia, karbon dioksida memiliki bilangan Henry yang sangat besar sehingga transfer massa pada sisi cairan patut dipertimbangkan. Reaksi berlangsung sangat cepat dan mencapai kesetimbangan, maka asumsi laju kinetik mempengaruhi koefisien transfer massa dapat diabaikan. Oleh karenanya, koefisien transfer massa pada sisi cairan hanya dipengaruhi faktor fisik (*physical mass transfer*) (Astarita and Savage, 1980).

Koefisien perpindahan massa (k_G dan k_L) dihitung dengan bilangan tidak berdimensi Sherwood yang merupakan fungsi sifat transpor, yaitu:

$$Sh_G = \sigma Re_G^\alpha Sc_G^\beta \quad (14)$$

$$Sh_L = \sigma Re_L^\alpha Sc_L^\beta \quad (15)$$

$$Sh_G = \frac{zRTk_Gd_h}{D_{i,m}} \quad (16)$$

$$Sh_L = \frac{k_L}{D_{CO_2}} \left(\frac{\mu_L^2}{\rho_L^2 g} \right)^{1/3} \quad (17)$$

Dimana σ , α , dan β adalah parameter yang ingin dicari pada studi ini.

Berhubung data dan informasi sifat transpor pada tekanan tinggi sangat terbatas (Zhang et al., 2005), maka diperlukan pendekatan teoritis/literatur untuk memperkirakannya. Sifat fisis dan transpor digunakan untuk perhitungan bilangan tidak berdimensi. Adapun ringkasan sumber literatur dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat fisis dan transpor yang digunakan pada pemodelan *stripper*

Sifat	Referensi	Keterangan
Difusivitas gas	(Fairbanks and Wilke, 1950; Wilke, 1950)	Metode Fuller-Schettler-Giddings untuk komponen murni dan metode Wilke untuk campuran
Viskositas gas	(Dean and Stiel, 1965; Wilke, 1950)	Metode Wilke untuk campuran tekanan rendah dan Dean-Stiel untuk campuran tekanan tinggi
Termal konduktivitas gas	(Stiel and Thodos, 1964; Yaws, 1999)	Data Yaws untuk komponen murni tekanan rendah dan metode Stiel-Thodos untuk tekanan tinggi
Difusivitas dan viskositas CO ₂ di larutan	(Frank et al., 1996; Lillia et al., 2018)	

Pemodelan matematis pada *stripper* diselesaikan dengan beberapa asumsi-asumsi berikut:

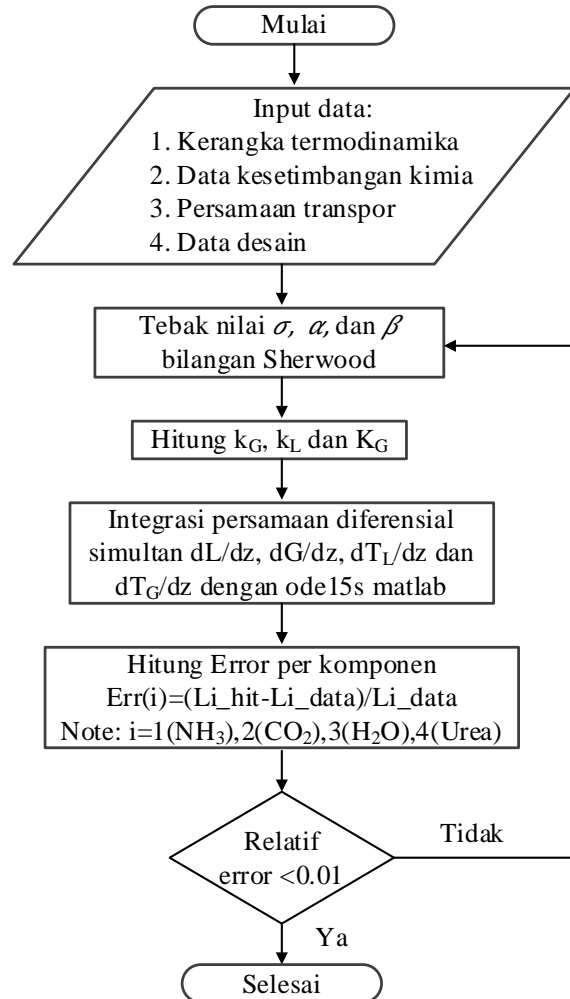
1. Perhitungan berbasis pada keadaan tunak (*steady state*) dan semua variabel hanya berubah pada arah aksial satu dimensi.
2. Reaksi pembentukan biuret diabaikan karena waktu tinggal pada *falling film* sangat singkat (Battisti et al., 2020).
3. Tidak ada kehilangan tekanan (*pressure drop*) selama proses berlangsung.

Persamaan diferensial diselesaikan dengan menggunakan ode *solver* dari MATLAB (ode15s). Adapun diagram alir penyelesaian persamaan matematis disajikan pada Gambar 2.

Hasil dan Pembahasan

Ringkasan hasil pemodelan dibandingkan dengan data pabrik komersial disajikan dalam Tabel 2. Terlihat nilai relatif deviasi keseluruhan dibawah 4% dimana hasil ini menunjukkan bahwa model memberikan performa yang memuaskan. Selain itu, deviasi pada urea menunjukkan hasil yang sangat baik. Pada penelitian terdahulu, hidrolisa

urea diasumsikan hanya terjadi 4% (Zhang et al., 2005). Sehingga model ini dapat memberikan gambaran reaksi hidrolisa pada kondisi berbeda untuk keperluan simulasi.



Gambar 2. Diagram alir penyelesaian persamaan matematis pada high pressure stripper

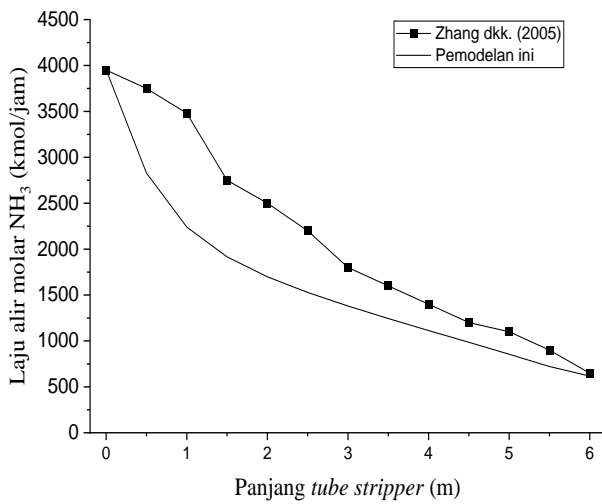
Tabel 2. Validasi model menggunakan data pabrik Zhang et. al (2005) pada tekanan 136 atm

		Laju Alir Molar (kmol/jam)					Temp. (K)
		NH ₃	CO ₂	H ₂ O	Urea	Inert	
Aliran Masuk	Fase Cair Des.	3950.2	1002.5	2283.5	1286.1	0	456
	Fase Cair Hit.	3952.7	962.6	2279.9	1275.0	0	463
	Fase Gas	0	1209.9	0	0	81	373
Aliran Keluar	Desain	617.3	308	2025.9	1234.7	0	438
Deviation		0.0631%	-3.9833%	-0.1579%	-0.8602%		1.5808%

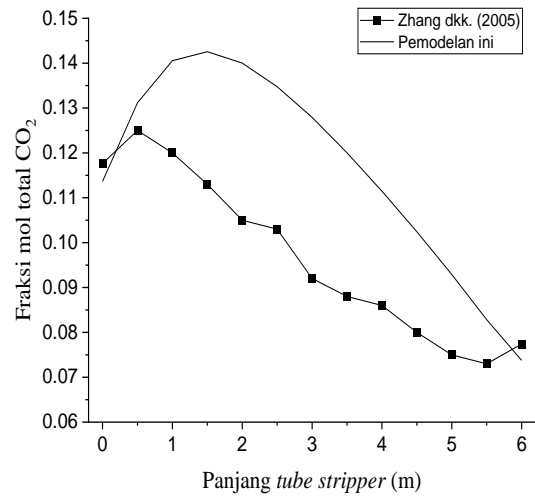
Profil aliran pada *stripper* disajikan dengan membandingkan pada penelitian sebelumnya yang menggunakan metode *equilibrium stage* (Zhang et al., 2005). Secara umum, profil aliran menunjukkan hasil yang serupa. Profil CO₂ pada fase cair terlihat fenomena unik seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Pada proses *stripping* ini digunakan CO₂ sebagai *stripping agent*, artinya sejumlah gas CO₂ diumpungkan untuk menurunkan tekanan parsial ammonia. Namun pada permulaan, CO₂ mengalami penyerapan kedalam larutan yang menunjukkan fraksi mol meningkat, kemudian komposisi CO₂ mengalami penurunan akibat pemanasan oleh *steam* hingga meninggalkan *stripper*.

Adapun profil temperatur tersaji pada Gambar 5. Terlihat bahwa temperatur cairan terjaga pada 473 K (200 °C) sepanjang *tube*. Dimana proses dekomposisi merupakan reaksi endotermis, sehingga *stripper* dijaga pada temperatur relatif lebih tinggi. Terlihat pada Gambar 6 dan 7, konversi pembentukan karbamat semakin rendah seiring dengan tingginya temperatur. Kemudian disepanjang *tube stripper*, karbamat mengalami dekomposisi dengan berkurangnya

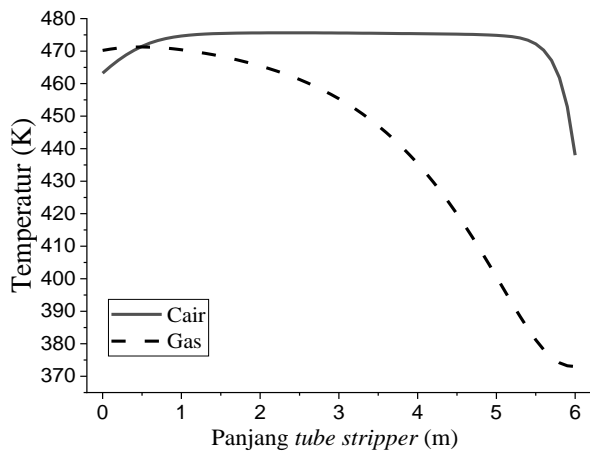
kadar karbamat di dalam cairan (Gambar 7). Nilai konversi karbamat yang diperoleh pada studi ini yaitu sekitar 75%, nilai ini tidak jauh berbeda dengan studi yang dilakukan oleh Cesari *et al*, (2005) yaitu 78.3%.



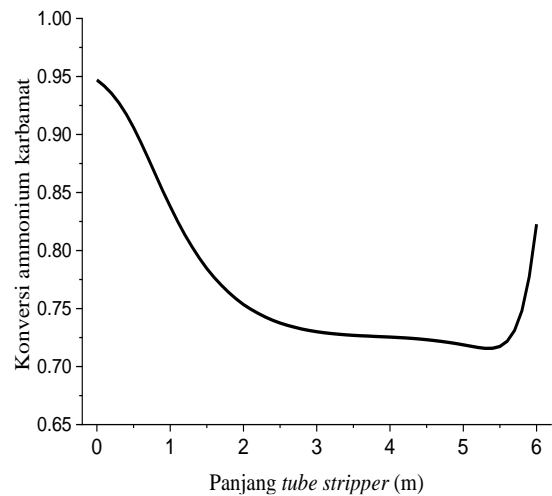
Gambar 3. Profil laju alir molar amonia



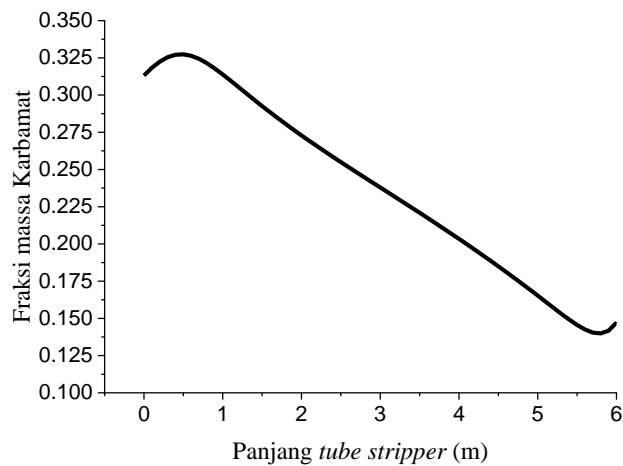
Gambar 4. Profil fraksi mol karbon dioksida



Gambar 5. Profil temperatur aliran pada cairan dan gas



Gambar 6. Konversi pembentukan karbamat sepanjang stripper



Gambar 7. Penurunan komposisi karbamat sepanjang stripper

Hubungan koefisien perpindah massa dan bilangan tak berdimensi Sherwood pada tahanan cair dan gas diperoleh pada studi ini yang disajikan pada Tabel 3. Sebagai referensi, bilangan Sherwood disesuaikan berdasarkan hasil perhitungan Rejl *et. al* (2016) dimana penelitiannya menggunakan *falling film* untuk keperluan absorpsi dan distilasi. Hasil yang diperoleh terdapat sedikit perbedaan, secara keseluruhan baik pada tahanan cair dan gas memiliki nilai yang lebih kecil dibanding Rejl *et. al* (2016). Hal ini dikarenakan proses *stripping* dilakukan pada tekanan tinggi, sehingga fluks perpindahan massa terjadi relatif lebih rendah.

Tabel 3. Korelasi bilangan tak berdimensi Sherwood pada Cairan dan Gas

	<i>Gas phase Sherwood number</i>	<i>Liquid phase Sherwood number</i>
Pemodelan ini	$Sh_G = 0.0023Re_{LG}^{0.8840}Sc_G^{0.61}$	$Sh_L = 0.25Re_L^{-0.2888}Sc_L^{0.47}$
(Rejl et al., 2016)	$Sh_G = 0.0023Re_{LG}^{1.070}Sc_G^{0.61}$	$Sh_L = 0.25Re_L^{-0.120}Sc_L^{0.47}$

Kesimpulan

Pemodelan matematis dekomposisi karbamat pada *stripper* tekanan tinggi telah disajikan dalam bentuk *rate-based* dengan kerangka termodinamika UNIQUAC dan persamaan keadaan Redlich-Kwong. Dengan relatif galat kurang dari 5% menunjukkan bahwa model berpotensi dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan praktis seperti simulasi proses, *troubleshooting* permasalahan operasional serta peningkatan kapasitas peralatan terpasang.

Daftar Notasi

- a = *interfacial area* [m²]
 $D_{i,m}$ = Koefisien difusi komponen pada campuran gas [m²/s]
 d_h = *diameter tube stripper* [m]
 G = laju alir molar gas [kmol/jam]
 H = Bilangan Henry [atm m³/kmol]
 K_G = koefisien perpindahan massa *overall* [kmol/m²/atm/jam]
 k_G, k_L = koefisien perpindahan massa pada tahanan gas, cair [kmol/m²/atm/jam]
 L = laju alir molar cair [kmol/jam]
 P = tekanan [atm]
 S = luas permukaan [m²]
 T = temperatur [K]
 z = *compressibility factor* [-]

Daftar Pustaka

- Aoki, H., Fujiwara, T., Morozumi, Y., Miura, T., 1999. Proceedings of the Fifth International Conference on Technologies and Combustion for Clean Environment.
- Astarita, G., Savage, D.W., 1980. Theory of chemical desorption. *Chemical Engineering Science* 35, 649–656. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(80\)80015-7](https://doi.org/10.1016/0009-2509(80)80015-7)
- Battisti, R., Machado, R.A.F., Marangoni, C., 2020. A background review on falling film distillation in wetted-wall columns: From fundamentals towards intensified technologies. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* 150, 107873. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107873>
- Cesari, D.K., Schbib, S., Borio, D.O., 2005. Steady State Analysis of a Falling Film Reactor. Second Mercosur Congress on Chemical Engineering.
- Chilton, T.H., Colburn, A.P., 1934. Mass Transfer (Absorption) Coefficients Prediction from Data on Heat Transfer and Fluid Friction. *Ind. Eng. Chem.* 26, 1183–1187. <https://doi.org/10.1021/ie50299a012>
- Dean, D.E., Stiel, L.I., 1965. The viscosity of nonpolar gas mixtures at moderate and high pressures. *AIChE J.* 11, 526–532. <https://doi.org/10.1002/aic.690110330>
- Erisman, J.W., Sutton, M.A., Galloway, J., Klimont, Z., Winiwarter, W., 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geosci* 1, 636–639. <https://doi.org/10.1038/ngeo325>
- Fairbanks, D.F., Wilke, C.R., 1950. Diffusion Coefficients in Multicomponent Gas Mixtures. *Ind. Eng. Chem.* 42, 471–475. <https://doi.org/10.1021/ie50483a022>
- Frank, M.J.W., Kuipers, J.A.M., van Swaaij, W.P.M., 1996. Diffusion Coefficients and Viscosities of CO₂ + H₂O, CO₂ + CH₃OH, NH₃ + H₂O, and NH₃ + CH₃OH Liquid Mixtures. *J. Chem. Eng. Data* 41, 297–302. <https://doi.org/10.1021/je950157k>
- Hamidipour, M., Mostoufi, N., Sotudeh-Gharebagh, R., 2005. Modeling the synthesis section of an industrial urea plant. *Chemical Engineering Journal* 106, 249–260. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2004.12.020>



- Heffer, P., Praud'homme, M., 2016. Global Nitrogen Fertiliser Demand and Supply : Trend, Current Level and Outlook. Proceedings of the 2016 International Nitrogen Initiative Conference, "Solutions to improve nitrogen use efficiency for the world" 4–8.
- Isla, M.A., Irazoqui, H.A., Genoud, C.M., 1993. Simulation of a urea synthesis reactor. 1. Thermodynamic framework. *Ind. Eng. Chem. Res.* 32, 2662–2670. <https://doi.org/10.1021/ie00023a033>
- Lemkowitz, S.M., De Cooker, M.G.R.T., Van Den Berg, P.J., 1973. An empirical thermodynamic model for the ammonia-water-carbon dioxide system at urea synthesis conditions. *J. Appl. Chem.* 23, 63–76. <https://doi.org/10.1002/jctb.5020230107>
- Levenspiel, O., 1999. *Chemical reaction engineering*, 3rd ed. ed. Wiley, New York.
- Lillia, S., Bonalumi, D., Fosbøl, P.L., Thomsen, K., Valenti, G., 2018. Experimental study of the aqueous CO₂-NH₃ rate of reaction for temperatures from 15 °C to 35 °C, NH₃ concentrations from 5% to 15% and CO₂ loadings from 0.2 to 0.6. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 70, 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.01.009>
- Mavrovic, I., Shirley, A.R., Coleman, G.R. "Buck," 2000. Urea, in: John Wiley & Sons, Inc. (Ed.), *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, p. 2118050113012218.a01. <https://doi.org/10.1002/0471238961.2118050113012218.a01>
- Maxwell, G.R., 2004. *Synthetic nitrogen products: a practical guide to the products and processes*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- Meessen, J.H., 2010. Urea, in: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (Ed.), *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, p. a27_333.pub2. https://doi.org/10.1002/14356007.a27_333.pub2
- Park, H.M., 2014. A multiscale modeling of carbon dioxide absorber and stripper using the Karhunen–Loève Galerkin method. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 75, 545–564. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2014.03.089>
- Piotrowski, J., Kozak, R., Kujawska, M., 1998. Thermodynamic model of chemical and phase equilibrium in the urea synthesis process. *Chemical Engineering Science* 53, 183–186. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(97\)00271-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(97)00271-6)
- Rahimpour, M.R., Barmaki, M.M., Mottaghi, H.R., 2010. A comparative study for simultaneous removal of urea, ammonia and carbon dioxide from industrial wastewater using a thermal hydrolyser. *Chemical Engineering Journal* 164, 155–167. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.08.046>
- Rejl, F.J., Haidl, J., Valenz, L., Moucha, T., Schultes, M., 2016. Analogy of absorption and distillation processes. Wetted-wall column study. *Chemical Engineering Science* 153, 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.07.021>
- Soave, G., 1993. 20 years of Redlich-Kwong equation of state. *Fluid Phase Equilibria* 82, 345–359. [https://doi.org/10.1016/0378-3812\(93\)87158-W](https://doi.org/10.1016/0378-3812(93)87158-W)
- Stiel, L.I., Thodos, G., 1964. The thermal conductivity of nonpolar substances in the dense gaseous and liquid regions. *AIChE J.* 10, 26–30. <https://doi.org/10.1002/aic.690100114>
- Voskov, A.L., Voronin, G.F., 2016. Thermodynamic Model of the Urea Synthesis Process. *J. Chem. Eng. Data* 61, 4110–4122. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.6b00557>
- Wilke, C.R., 1950. A Viscosity Equation for Gas Mixtures. *The Journal of Chemical Physics* 18, 517–519. <https://doi.org/10.1063/1.1747673>
- Yaws, C.L., 1999. *Chemical properties handbook: physical, thermodynamic, environmental, transport, safety, and health related properties for organic and inorganic chemicals*, McGraw-Hill handbooks. McGraw-Hill, New York.
- Yubing, R., 2010. High Pressure Stripper Efficiency Problems. *UreaKnowHow* 1–9.
- Zendehboudi, S., Zahedi, G., Bahadori, A., Lohi, A., Elkamel, A., Chatzis, I., 2014. A dual approach for modelling and optimisation of industrial urea reactor: Smart technique and grey box model. *Can. J. Chem. Eng.* 92, 469–485. <https://doi.org/10.1002/cjce.21824>
- Zhang, X., Davidson, E.A., Mauzerall, D.L., Searchinger, T.D., Dumas, P., Shen, Y., 2015. Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528, 51–59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>
- Zhang, X., Zhang, S., Yao, P., Yuan, Y., 2005. Modeling and simulation of high-pressure urea synthesis loop. *Computers & Chemical Engineering* 29, 983–992. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2004.10.004>

