



Simulasi Unit *Stripping* CO₂ Dalam *Packed Column* Skala Industri Dengan Kondisi *Non-Isothermal*

Simulation of Industrial Scale Column CO₂ Stripping Units With Non-Isothermal Conditions

Nur Ihda Farikhatin Nisa^{1*}, Ali Altway², Susianto²

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Madiun
Jl. Auri No.14-16, Kota Madiun, Jawa Timur, Indonesia 63117

²Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Raya ITS, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia 60111

*E-mail: nurihda_fn@unipma.ac.id

Terima draft: 25 April 2019; Terima draft revisi: 04 Juni 2019; Disetujui: 08 Juni 2019

Abstrak

Emisi karbondioksida ke atmosfer dianggap sebagai penyebab utama perubahan iklim, termasuk pemanasan global dan permasalahan pertanian. Berbagai teknologi pemisahan CO₂ banyak dikembangkan. Absorpsi kimia adalah teknologi pemisahan yang paling efektif dan banyak digunakan dalam industri kimia maupun petrokimia. Dimana pelarut yang telah digunakan dapat di regenerasi kembali di kolom *stripper*. *Stripping* adalah proses regenerasi termal pelarut dimana larutan tersebut dikontakkan dengan pelarut gas yang tidak larut terhadap cairan tersebut. Penelitian ini bertujuan mengembangkan simulasi untuk mengestimasi kinerja unit *stripping* CO₂ dalam *packed column* skala industri. Simulasi dilakukan secara teoritis dengan mengembangkan model matematis untuk proses *stripping* CO₂ dalam *packed column* skala industri. Selanjutnya hasil simulasi divalidasi dengan data riil pada salah satu industri pupuk NPK di Indonesia. Variabel-variabel yang digunakan adalah tekanan operasi kolom, temperatur *rich solution* dan laju steam. Hasil simulasi untuk tekanan *stripper* 2,56 atm dengan laju *rich solution* 2943316 kg/jam dan temperatur *rich solution* 390 K menunjukkan CO₂ (% mol) 99,038%, sedangkan data pabrik menunjukkan 97,5862%.

Kata kunci: karbondioksida, packed column, removal, stripper, steam

Abstract

Carbon dioxide is a problem that is considered the cause of climate change, including global warming and agricultural problems. Many CO₂ separation technologies have been developed. Chemical absorption is the most effective separation technology and is widely used in the chemical and petrochemical industries. Where the solvent that has been used can be regenerated again in the stripper column. Stripping is a solvent-thermal regeneration process where the solution is contacted with an insoluble gas solvent to the liquid. This study aims to develop simulations to estimate the performance of CO₂ stripping units in packed column industrial scale. The simulation is done theoretically by developing a mathematical model for the process of stripping CO₂ in industrial packed column scales. Furthermore, the simulation results are validated with real on-one of the NPK fertilizer industries in Indonesia. The variables are the operating pressure column, the temperature rich solution and the rate of steam. The simulation results for a stripper pressure of 2,56 atm at the rate of rich solution 2943316 kg/hour and the temperature of the rich solution 390 K shows CO₂ (mol%) 99,038%, while the plant data shows 97,5862%.

Keywords: carbon dioxide, packed column, removal, stripper, steam

1. Pendahuluan

Emisi karbondioksida (CO₂) ke atmosfer dianggap sebagai penyebab utama perubahan iklim, termasuk pemanasan global dan permasalahan pertanian (Chu dkk., 2012; Hegerl dkk., 2014; Howard-Grenville dkk., 2014; Rutgersson dkk., 2014). Penggunaan bahan bakar fosil

sebagai sumber energi juga akan menyebabkan peningkatan emisi CO₂ ke atmosfer, sehingga perubahan iklim juga akan terus berlanjut (Hu dkk., 2016).

CO₂ merupakan gas yang bersifat asam dan korosif yang dapat menyebabkan kerusakan utilitas pabrik maupun sistim perpipaanya. Oleh karena itu, CO₂ harus dipisahkan dari

aliran gas khususnya pada sintesis amonia, crude hydrogen, gas alam dan power plant (Borhani dkk., 2015). CO₂ juga dapat menurunkan nilai kalor dari gas alam. Pada kilang *Liquefied Natural Gas* (LNG), CO₂ harus dihilangkan karena CO₂ akan membeku pada suhu yang sangat rendah sehingga dapat menyumbat sistem perpipaan dan juga dapat merusak *tubing* pada *main heat exchanger*. Selain itu, CO₂ juga merupakan produk samping dari industri amonia. CO₂ merupakan racun terhadap katalis sintesa amonia, sehingga CO₂ harus dipisahkan dari aliran gas sebelum memasuki unit sintesa amonia.

Sejumlah teknologi pemisahan dapat digunakan untuk memisahkan kandungan CO₂ dari sistem, diantaranya adsorpsi (Krishnaiah dkk., 2014), absorpsi (Endo dkk., 2011), *cryogenic* (Scholes dkk., 2013), membran (Khalilpour dkk., 2015) dan kombinasi dari berbagai teknik pemisahan (Masoumi dkk., 2013; Tuinier dkk., 2011). Absorpsi kimia adalah teknologi pemisahan yang paling efektif dan banyak digunakan dalam industri kimia maupun petrokimia (Khan dkk., 2011; Ahad dkk., 2011). Absorpsi kimia melibatkan reaksi antara CO₂ dengan pelarut kimia untuk membentuk senyawa antara yang mempunyai ikatan lemah yang apabila diregenerasi dengan panas menghasilkan pelarut murni dan CO₂ (Kohl dkk., 1997). Selektivitas dari teknologi pemisahan ini relatif tinggi sehingga dapat menghasilkan CO₂ murni (Olajire, 2010). Untuk teknologi pemisahan yang lain diantaranya *cryogenic separation* kemurnian CO₂ yang bisa dicapai sebesar >90%, *membrane technology* yang sangat *sensitive* terhadap senyawa sulfur sehingga tingkat pemisahan yang tinggi belum bisa dicapai dan *chemical-looping combustion* (CLC) dimana belum ada percobaan dalam skala besar yang pernah dilakukan sehingga belum terbukti untuk skala industri (Badiei dkk., 2012; Olajire, 2010). Faktor-faktor ini yang menyebabkan absorpsi kimia sangat cocok untuk pemisahan CO₂ pada berbagai proses industri.

Faktor biaya terbesar untuk memisahkan CO₂ dari sistem adalah konsumsi energi yang dibutuhkan untuk regenerasi pelarut yang dapat mencapai 80% dari total biaya penangkapan CO₂ (Mahmoodi dkk., 2017). Faktor lain adalah kapasitas dari pelarut yang dapat menentukan jumlah CO₂ yang diserap per unit pelarut. Banyak pelarut yang dapat digunakan dalam pemrosesan gas, tetapi pelarut yang paling efektif adalah

pelarut alkanolamine dan K₂CO₃ panas (Ahmad dkk., 2014).

Stripping adalah proses regenerasi termal pelarut dimana larutan tersebut dikontakkan dengan pelarut gas yang tidak larut terhadap cairan tersebut. Kolom *stripper* terdiri dari beberapa buah *bed* yang berisi tumpukan *packing* serta beroperasi pada suhu dan tekanan tertentu.

Untuk men-*stripping* CO₂ digunakan *steam* bertekanan rendah yang berasal dari *reboiler*. Penggunaan suhu tinggi serta dorongan *steam* ke atas diharapkan gas CO₂ dalam larutan *rich solution* akan terlepas. Setelah melewati *bed* yang kedua, larutan ditampung dalam *trap out pan*, tempat sebagian larutan dikeluarkan sebagai larutan *lean solution* menuju *absorber*, dan sebagian lagi mengalir ke *bed* selanjutnya untuk ditampung dalam *trap out pan* selanjutnya. Kemudian larutan ini dialirkan ke *reboiler* dan *steam* yang terbentuk dimasukkan bagian bawah *stripper*. Larutan *lean solution* yang keluar dari dasar *stripper* dialirkan ke puncak *absorber*, sedangkan gas CO₂ keluar dari puncak menara.

Uap air yang terkandung dalam gas ini cukup tinggi, yaitu sekitar 45%, sehingga perlu dikurangi dahulu kadar airnya. Untuk mengurangi kadar air dalam gas CO₂, maka gas dimasukkan dalam CO₂ *overhead condensor*, untuk didinginkan kemudian dipisahkan kondensatnya dalam CO₂ *stripper reflux drum*. Kondensat ini dimasukkan ke bagian atas *stripper* dengan pompa, sedangkan gas CO₂ yang keluar dibuang atau siap digunakan untuk proses lainnya.

Penelitian-penelitian terdahulu tentang unit *stripping* CO₂ telah banyak dilakukan. Adapun uraian dari penelitian-penelitian tersebut disajikan dalam Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Penelitian terdahulu tentang unit *stripping* CO₂

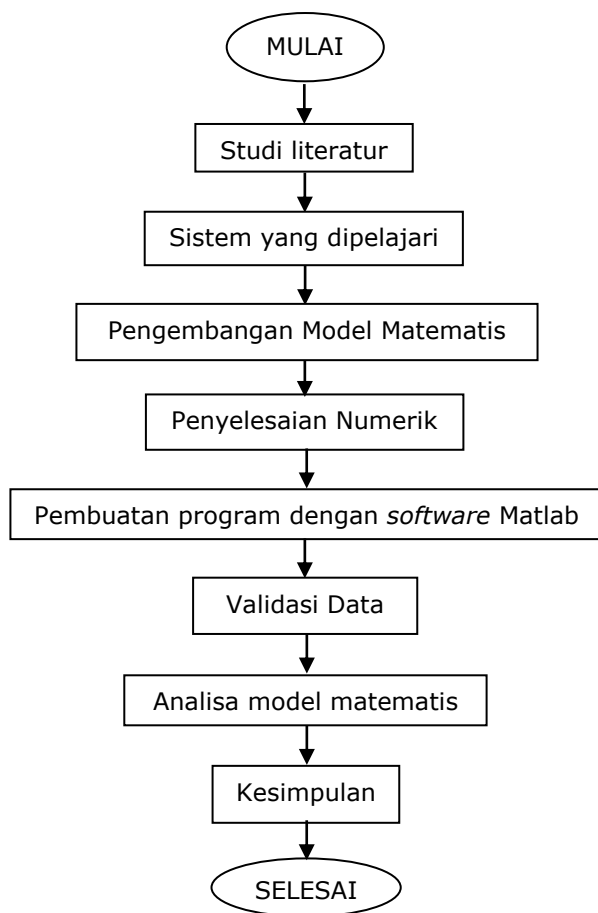
Nama peneliti	Topik	Hasil
Oyenekean dkk (2009)	<i>Rate-based</i> model dari <i>stripper</i> pada tekanan normal (160 kPa) dan vakum (30 kPa) dengan Aspen Custom Modeler (ACM) untuk desorpsi CO ₂	a. <i>Stripping</i> CO ₂ pada tekanan vakum dikontrol oleh transfer massa dengan reaksi dilapisan batas dan difusi dari reaktan dan produk. b. <i>Stripping</i> CO ₂ pada tekanan normal dikontrol oleh transfer

Nama peneliti	Topik	Hasil	Nama peneliti	Topik	Hasil
	dari 5 m K ⁺ /2,5 m piperazine	massa dengan reaksi kesetimbangan. c. Energi yang dibutuhkan pada proses <i>stripping</i> CO ₂ dan kompresi 10 MPa untuk mencapai 90% CO ₂ <i>removal</i> adalah sebesar 37 kJ/gmol CO ₂ .			pada <i>rich solution</i> yang masuk <i>desorber</i> dan tidak bergantung pada temperatur <i>rich solution</i> .
Wagener dkk (2011)	Konfigurasi <i>stripper</i> untuk CO ₂ capture dengan pelarut monoethanol amine (MEA) dan piperazine (PZ) menggunakan Aspen plus	a. 8 m PZ secara konsisten mempunyai kebutuhan energi yang lebih rendah dari 9 m MEA. b. Konfigurasi dengan <i>packed column</i> menunjukkan peningkatan konsumsi energi sebesar 9%-11%			b. Besarnya nilai AARD (<i>average absolute relative deviation</i>) sebesar 9,2% selama 78 kali percobaan.
Wagener dkk (2011)	Konfigurasi <i>stripper</i> untuk CO ₂ capture dengan pelarut MEA	a. Konfigurasi dengan <i>interheated column</i> membutuhkan energi sebesar 33,4 kJ/mol CO ₂ . b. Untuk <i>stripper</i> sederhana kebutuhan energi sebesar 35 kJ/mol CO ₂ .	Di industri, proses absorpsi/ <i>stripping</i> CO ₂ terjadi pada tekanan tinggi, beberapa komponen disamping CO ₂ dapat terserap dan terjadi interaksi antar komponen dalam film gas maupun film likuida yang mempengaruhi proses perpindahan massa maupun reaksi kimia (Nisa dkk., 2013). Absorpsi reaktif melibatkan berbagai komponen campuran gas dan campuran likuida yang mewakili campuran multikomponen gas dan atau cairan yang properti perpindahannya jauh lebih kompleks dibandingkan dengan perpindahan massa binari sederhana, sementara sebagian besar model adalah uni komponen yang mengasumsikan hanya satu komponen yang berpindah melalui <i>interface</i> atau difusi molekular tunggal. Dalam praktek industri, geometri unit <i>absorber</i> atau <i>stripper</i> yang digunakan terdiri dari dua kolom dengan diameter yang berbeda untuk memenuhi persyaratan hidronamik tertentu (Altway dkk., 2015).		
Wagener dkk (2013)	Pemodelan <i>stripper</i> dalam skala <i>pilot plant</i> untuk CO ₂ capture dengan pelarut PZ	a. Beban panas terendah untuk <i>stripper</i> sederhana sebesar 128 kJ/mol CO ₂ , sedangkan untuk 2-stage <i>flash</i> sebesar 170 kJ/mol CO ₂ . b. Analisis sensitivitas menunjukkan beban panas dapat dikurangi menjadi 143 kJ/mol CO ₂ dengan sisi panas mendekati 10°C.	Dari penelitian-penelitian terdahulu, sejauh penelusuran penulis penelitian tentang simulasi unit <i>stripping</i> CO ₂ dalam <i>packed column</i> skala industri masih jarang ditemukan dalam literatur. Geometri yang digunakan pada penelitian-penelitian terdahulu kebanyakan masih menggunakan skala laboratorium, sedangkan pada penelitian ini geometri yang digunakan adalah geometri skala industri dimana diameter kolom atas lebih besar daripada diameter kolom bawah.		
Garcia dkk (2017)	Simulasi model kolom desorpsi dengan pelarut MEA menggunakan Aspen plus	a. Deviasi unit <i>stripping</i> CO ₂ terhadap data eksperimen bergantung pada kandungan CO ₂	Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan simulasi untuk mengestimasi kinerja unit <i>stripping</i> CO ₂ dalam <i>packed column</i> skala industri. Pengaruh berbagai variabel proses seperti tekanan operasi kolom, temperatur <i>rich solution</i> dan laju steam pada pelepasan CO ₂ juga dipelajari.		

2. Metodologi

2.1. Model Matematis

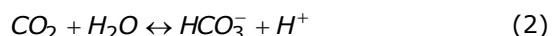
Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan secara teoritis (simulasi) dengan mengembangkan model matematis untuk fenomena perpindahan massa dan panas yang disertai reaksi kimia pada proses pelepasan CO₂ dari larutan KHCO₃ pada kondisi *non-isothermal* dengan menggunakan steam. Adapun langkah-langkah penelitian dapat dilihat pada Gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Dari Gambar 1 dapat dilihat bahwa tahapan dalam penelitian ini diawali dengan studi literatur, kemudian menyiapkan data-data dari sistem yang akan diteliti, mengembangkan model matematis proses *stripping* dalam *packed column*, menyelesaikan persamaan-persamaan dari model secara numerik dan dilanjutkan dengan membuat program dengan *software* matlab. Tahap yang terakhir yaitu memvalidasi hasil penelitian dengan data di salah satu industri pupuk NPK dilanjutkan dengan menganalisis model matematis yang diperoleh.

Model yang dikembangkan didasarkan pada asumsi *steady state*, proses adiabatik, pola *plug flow* untuk gas dan liquid, mengabaikan jumlah pelarut yang menguap dan tekanan konstan sepanjang kolom. Model ini juga didasarkan pada dua teori film yang menggabungkan interaksi antara reaksi difusi terhadap konsep *enhancement factor*. Efek panas karena reaksi eksotermis diperhitungkan dalam model. Dimana model yang digunakan adalah difusi multikomponen. Model yang diperoleh digunakan untuk mensimulasikan pelepasan CO₂ pada kolom *stripper*. Dimana reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut (Paul dkk, 2012) :



Dengan harga konstanta kesetimbangan pada temperatur T°C mengikuti korelasi (Yi dkk, 2009) :

$$\log K_1 = \frac{-3404,7}{T} + 14,843 - 0,03279T \quad (5)$$

$$K_2 = \exp \left(\frac{-294,74 + \frac{3,6439 \times 10^5}{T}}{1,8416 \times 10^8} - \frac{4,1579 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{3,5429 \times 10^{12}}{T^4} \right) \quad (6)$$

$$K_w = \exp \left(\frac{39,555 - \frac{9,878 \times 10^4}{T}}{5,6883 \times 10^7} - \frac{1,4645 \times 10^{10}}{T^3} + \frac{1,3615 \times 10^{12}}{T^4} \right) \quad (7)$$

Keterangan :

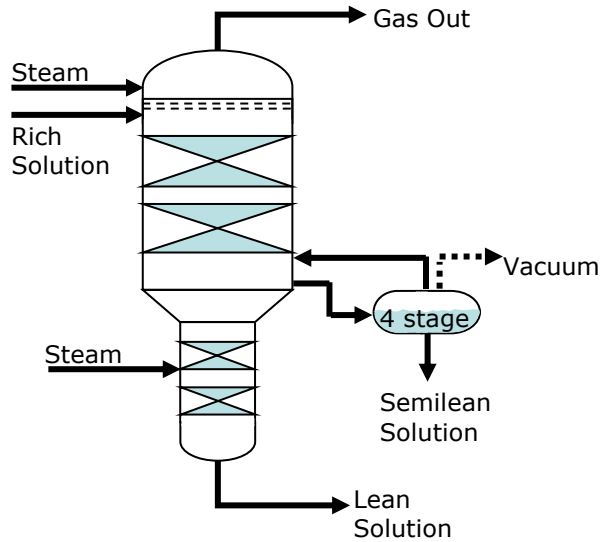
K₁ : [HCO₃⁻][H⁺]/[CO₂] , mol.m⁻³

K₂ : [CO₃⁼][H⁺]/[HCO₃⁻] , mol.m⁻³

K_w : Konstanta kesetimbangan air, mol.m⁻³

T : Temperatur liquid, °C

Gambar 2 menunjukkan desain unit *stripping* CO₂ skala industri. Dimana diameter kolom atas lebih besar daripada diameter kolom bawah.



Gambar 2. Unit *stripping* CO₂ skala industri

Adapun spesifikasi dari unit tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi unit *stripping* CO₂ skala industri pada salah satu industri pupuk NPK di Indonesia

Kolom stripper	Tinggi kolom	Diameter kolom	Ukuran packing
Atas	18,29 m	4,875 m	0,07 m
Bawah	9,145 m	3,050 m	0,05 m

Model untuk *stripper* serupa dengan *absorber* hanya saja perpindahan massa dari liquida ke gas dan rate perpindahan massa dinyatakan dengan :

$$\text{CO}_2 : \bar{R}_{AA} = Ek_L a (C_{AE} - C_A^*) \quad (8)$$

$$\text{Gas terlarut (k)} : \bar{R}_{Kk} = k_L a (C_K^0 - C_K^*) \quad (9)$$

Keterangan :

- $\bar{R}$: laju absorpsi rata-rata dalam waktu kontak t, mol.m⁻²s⁻¹
- a : Luas permukaan gas-liquida per unit volume dari packed column, m².m⁻³
- E : Enhancement factor
- k_L : Koefisien perpindahan massa dari sisi liquida, kmol.m⁻².s⁻¹
- C_{Ae} : Konsentrasi gas CO₂ berkesetimbangan dalam liquida, kmol. m⁻³
- C_A^{*} : Konsentrasi gas CO₂ dalam *interface*, mol.m⁻³
- C_K⁰ : Konsentrasi gas terlarut pada *bulk*, mol.m⁻³
- C_K^{*} : Konsentrasi gas terlarut dalam *interface*, mol.m⁻³

Neraca panas pada proses *stripping* dibutuhkan untuk mengetahui distribusi temperatur fase liquida dan fase gas dalam *packed column*. Persamaan neraca panas differensial pada sisi gas dan temperatur

liquida diberikan pada persamaan (10) dan (11) :

$$\frac{dT_G}{dz} = -\frac{h_G a}{C_{pG} G} (T_G - T_L) \quad (10)$$

$$T_L = T_{Lin} + \frac{GC_{pG}}{LC_{pL}} (T_G - T_{Gin}) - \frac{(-\Delta H_{rx}) G_{in}}{LC_{pL}} (Y_{CO_2 in} - Y_{CO_2}) \quad (11)$$

Keterangan :

- T_G : Temperatur aliran gas, K
- z : Posisi axial dalam packed column, m
- h_G : Parameter spesifik gas, m³.kmol⁻¹
- C_{pG} : Kapasitas panas gas, Joule.kg⁻¹.K⁻¹
- C_{pL} : Kapasitas panas liquida, Joule.kg⁻¹.K⁻¹
- G : Kecepatan massa gas, kg.m⁻².s⁻¹
- L : Kecepatan massa liquida, kg.m⁻².s⁻¹
- T_L : Temperatur aliran liquida, K
- ΔH_{rx} : Panas reaksi, Joule.kmol⁻¹
- Y_{CO2} : Rasio molar CO₂, mol CO₂/mol gas Masuk

2.2. Penyelesaian Numerik

Penyelesaian persamaan-persamaan aljabar *nonlinier* diselesaikan secara numerik menggunakan metode *orthogonal collocation* dengan 6 titik internal *collocation*. Metode ini digunakan untuk menyelesaikan persamaan-persamaan differensial dan integral dengan memilih titik *collocation* secara langsung. Dimana, semakin banyak titik *collocation* yang dipilih maka eror yang diperoleh semakin kecil. Penerapan metode ini diantaranya untuk menyelesaikan persamaan differensial dari fenomena difusi dan reaksi dalam partikel katalis (Soliman dkk, 2014). (Binous dkk, 2015) juga menggunakan metode *orthogonal collocation* untuk menyelesaikan permasalahan dua dimensi dalam kondisi *steady* dan *unsteady state*.

Dengan metode *orthogonal collocation*, hasil integral untuk persamaan (10) ditunjukkan pada persamaan (12).

$$T_G - T_{Gout} = -N_G \sum_{j=1}^{N+2} H_{i,j} [T_{G,j} - T_{L,j}] \quad (12)$$

Keterangan :

- T_G : Temperatur aliran gas, K
- N_G : Bilangan tak berdimensi
- H_{i,j} : Bobot kuadratur
- T_{G,j} : Temperatur gas pada titik kolokasi *packed column*, K
- T_{L,j} : Temperatur liquida pada titik kolokasi *packed column*, K

Dimana N_G didefinisikan sebagai :

$$N_G = \frac{h_G a Z_T}{C_{pG} G} \quad (13)$$

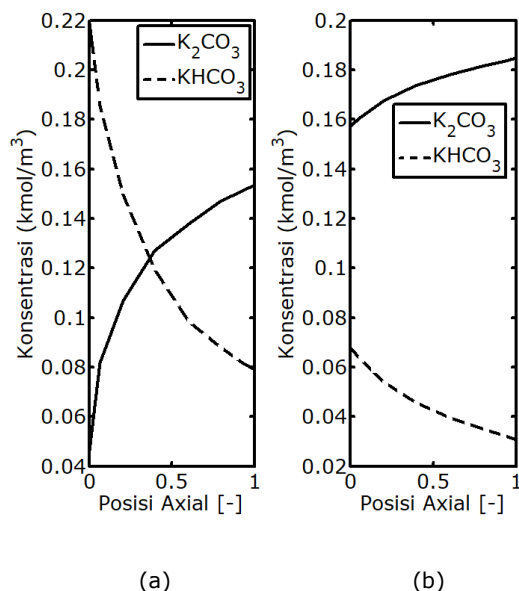
Keterangan :

h_G = Parameter spesifik gas, $m^3 kmol^{-1}$
 a = Luas permukaan gas-liquida per unit volume dari packed column, $m^2.m^{-3}$
 Z_T = Tinggi packing, m
 C_{pG} = Kapasitas panas gas, $Joule.kg^{-1}.K^{-1}$
 G = Kecepatan massa gas, $kg.m^{-2}.s^{-1}$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Distribusi Konsentrasi Pada Packed Column

Larutan K_2CO_3 yang telah digunakan untuk menyerap gas CO_2 di kolom absorpsi kemudian di *stripping* untuk memisahkan CO_2 yang telah terserap dari larutan K_2CO_3 . Sehingga larutan K_2CO_3 tersebut dapat digunakan kembali pada unit absorpsi. Gambar 3 menunjukkan bahwa konsentrasi K_2CO_3 mengalami peningkatan, dimana konsentrasi awal K_2CO_3 sebesar $0,046388 kmol/m^3$ dan konsentrasi K_2CO_3 yang keluar dari kolom *stripper* sebesar $0,18238 kmol/m^3$. Hal ini terjadi karena penguraian larutan $KHCO_3$ dalam *packed column* menjadi K_2CO_3 dan CO_2 (Mahmoodi dkk, 2017), sehingga konsentrasi larutan $KHCO_3$ mengalami penurunan dari $0,21868 kmol/m^3$ menjadi $0,033806 kmol/m^3$. Posisi axial 0 menunjukkan posisi bawah kolom baik untuk kolom atas maupun kolom bawah. Sedangkan posisi axial 1 menunjukkan posisi atas kolom baik untuk kolom atas maupun kolom bawah. Sedangkan mol fraksi gas masuk dan gas keluar dari *stripper* dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 3. Distribusi konsentrasi K_2CO_3 dan $KHCO_3$ pada : a) kolom atas dan b) kolom bawah

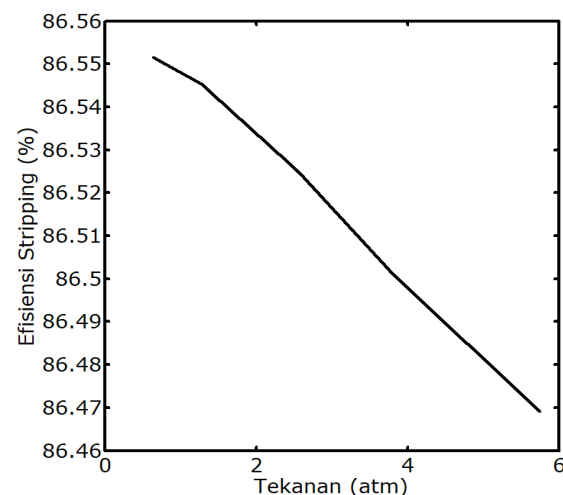
Tabel 3. Mol fraksi gas masuk dan gas keluar dari *stripper*

No	Komponen	Mol Fraksi Masuk	Mol Fraksi Keluar
1.	CO_2	0,00892	0,98984
2.	CO	0,00389	3,5641e-005
3.	H_2	0,72729	0,0085459
4.	N_2	0,25298	0,0015162
5.	CH_4	0,00389	3,5641e-005
6.	Argon	0,00304	2,5938e-005

Dari Tabel 3 diatas dapat dilihat bahwa mol fraksi gas CO_2 yang keluar dari *stripper* mengalami peningkatan dari mol fraksi gas CO_2 masuk. Hal ini menunjukkan bahwa gas CO_2 yang terlepas dari sistem cukup banyak. Dimana selain CO_2 terdapat juga gas-gas yang lain yang ikut terlepas ke udara bersama gas CO_2 .

3.2. Pengaruh Tekanan Stripper terhadap % Efisiensi Stripping

Tekanan *stripper* sangat penting dalam proses removal CO_2 . Gambar 4 menunjukkan bahwa semakin besar tekanan kolom *stripper* maka % efisiensi kolom *stripping* menjadi semakin kecil. Pada tekanan kolom *stripper* sebesar 0,6 atm diperoleh % efisiensi *stripping* sebesar 86,5515% dan pada tekanan 5,7 atm diperoleh % efisiensi *stripping* sebesar 86,4691%. Hal ini disebabkan karena pada saat tekanan *stripper* dinaikkan maka kelarutan gas-gas ke dalam larutan K_2CO_3 menjadi semakin besar, sehingga gas CO_2 yang terserap dalam larutan K_2CO_3 sulit untuk lepas. Akibatnya efisiensi *stripping* menjadi lebih kecil.

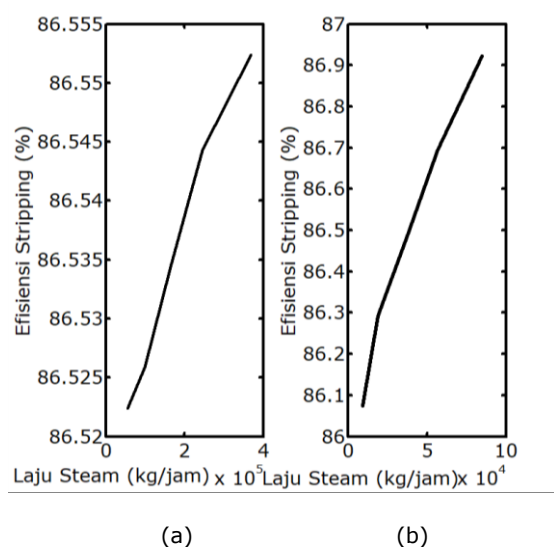


Gambar 4. Pengaruh tekanan *stripper* terhadap % efisiensi kolom *stripping*

Akan tetapi, penurunan efisiensi *stripping* ini tidak signifikan. Hal ini terjadi karena pada ujung atas *stripper* (tempat keluar gas CO_2) operasi kolom lebih banyak dikontrol oleh difusi dari reaktan atau produk daripada oleh gas (Mahmoodi dkk, 2017)

3.3. Pengaruh Laju Steam terhadap % Efisiensi *Stripping*

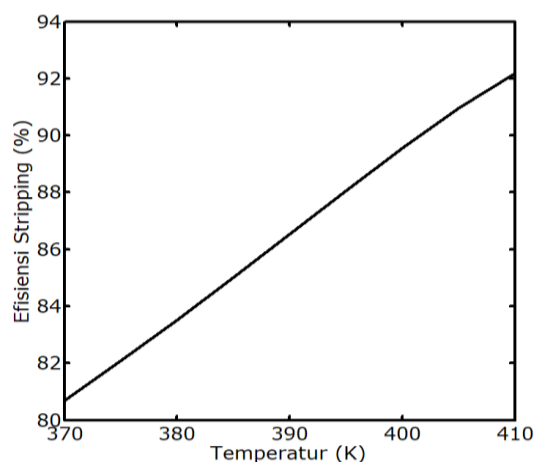
Laju steam merupakan salah satu faktor yang menentukan kinerja unit *stripping*. Gambar 5 memperlihatkan bahwa kenaikan laju steam memberikan pengaruh terhadap kenaikan % efisiensi kolom *stripping*. Untuk kolom atas, pada saat laju steam 54664 kg/jam diperoleh % efisiensi *stripping* sebesar 86,5224%. Sedangkan pada saat laju steam 368983 kg/jam, % efisiensi *stripping* yang diperoleh sebesar 86,5524%. Untuk kolom bawah, pada saat laju steam 9454 kg/jam diperoleh % efisiensi *stripping* sebesar 86,0751%. Sedangkan pada saat laju steam 85082 kg/jam, % efisiensi *stripping* yang diperoleh sebesar 86,9217%. Hal ini disebabkan karena semakin besar laju steam maka semakin kecil kelarutan gas terlarut dalam liquids, sehingga gas CO_2 yang terserap dalam larutan K_2CO_3 semakin mudah untuk lepas. Akibatnya % efisiensi *stripping* yang dihasilkan menjadi semakin besar. Steam mempunyai efek yang besar pada jumlah panas yang ditambahkan pada kolom untuk mencapai tingkat pemisahan yang diinginkan (mahmoodi dkk, 2017). Laju steam optimum terjadi pada saat laju sebesar 423917 kg/jam untuk kolom atas dan 100024 kg/jam untuk kolom bawah.



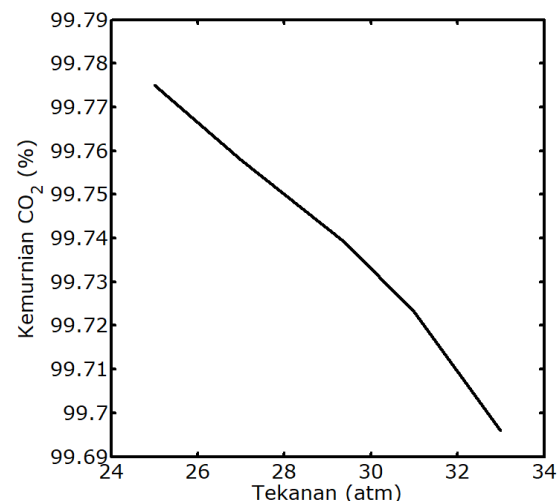
Gambar 5. Pengaruh laju steam terhadap % efisiensi kolom *stripping* pada : a) kolom atas dan b) kolom bawah

3.4. Pengaruh Temperatur *Rich Solution* terhadap % Efisiensi *Stripping*

Temperatur *rich solution* adalah temperatur dari liquids yang keluar dari *absorber* dan masuk ke dalam unit *stripping*. Gambar 6 menunjukkan bahwa semakin besar temperatur *rich solution* maka semakin besar pula % efisiensi *stripping* yang diperoleh. Pada temperatur 370 K diperoleh % efisiensi *stripping* sebesar 93,8043%. Hal ini disebabkan karena semakin besar temperatur larutan maka laju reaksi dan difusi meningkat; dan semakin besar juga *gradient* konsentrasi yang dekat dengan *interface* gas-liquida (Altway dkk, 2015). Selain itu, peningkatan temperatur liquids juga mengurangi kelarutan gas-gas (Mahmoodi dkk, 2017). Dimana, semakin kecil kelarutan gas-gas maka % efisiensi *stripping* yang dihasilkan menjadi semakin besar.



Gambar 6. Pengaruh temperatur *rich solution* terhadap % efisiensi kolom *stripping*



Gambar 7. Pengaruh tekanan *absorber* terhadap % kemurnian CO_2 dalam aliran gas yang keluar dari *stripper*

3.5. Pengaruh Tekanan *Absorber* terhadap % Kemurnian CO₂ dalam aliran gas yang keluar dari *stripper*

Unit CO₂ removal terdiri dari unit *absorber* dan unit *stripper*. Selain tekanan kolom *stripper*, tekanan kolom *absorber* juga memberikan pengaruh terhadap proses ini. Gambar 7 menunjukkan bahwa semakin besar tekanan kolom *absorber*, maka % kemurnian CO₂ dalam aliran gas yang keluar dari *stripper* menjadi semakin kecil. Pada tekanan *absorber* 25 atm diperoleh % kemurnian CO₂ sebesar 99,775%. Sedangkan pada tekanan *absorber* 33 atm diperoleh % kemurnian CO₂ sebesar 99,696%. Hal ini disebabkan karena pada saat tekanan *absorber* dinaikkan maka kelarutan gas-gas ke dalam larutan K₂CO₃ menjadi semakin besar, sehingga gas-gas lain selain CO₂ yang terlarut ke dalam larutan K₂CO₃ juga menjadi semakin besar (Altway dkk, 2015). Sehingga % kemurnian gas CO₂ yang diperoleh dari proses *stripping* menjadi lebih kecil. Tekanan *absorber* optimal terjadi pada saat tekanan sebesar 39 atm. Perbandingan antara hasil simulasi dengan data pada salah satu industri pupuk NPK di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan antara hasil simulasi dengan data pada salah satu industri pupuk NPK

Variabel Perbandingan	Hasil Simulasi	Data Ammonia Plant
Laju alir <i>rich solution</i> (kg/jam)	2943316	2943316
Temperatur <i>rich solution</i> (K)	390	390
Laju steam kolom atas (kg/jam)	109328	109328
Laju steam kolom bawah (K)	37814	37814
Tekanan (atm)	2,56	2,56
Kemurnian CO ₂ (%)	99,038	97,5862

Dari Tabel 4 diatas dapat dilihat bahwa dengan kondisi operasi kolom yang sama diperoleh persen mol CO₂ sebesar 99,038%, sedangkan data pabrik menunjukkan 97,5862%. Hasil ini menunjukkan bahwa akurasi model yang telah dibuat memiliki akurasi yang tinggi dengan persen kesalahan sebesar 1,45% dibandingkan dengan data lapangan.

4. Kesimpulan

Dalam penelitian ini, telah dikembangkan pemodelan matematis untuk mempelajari pelepasan CO₂ dari larutan KHCO₃ dalam

packed column skala industri yang terdiri dari dua kolom, dimana kolom bagian atas memiliki diameter yang lebih besar dari kolom bagian bawah. Hasil simulasi untuk tekanan *stripper* 2,56 atm dengan laju *rich solution* 2943316 kg/jam dan temperatur *rich solution* 390 K menunjukkan CO₂ (% mol) 99,038%, sedangkan data pabrik menunjukkan 97,5862%. Hasil ini menunjukkan bahwa akurasi model prediksi kami tinggi dengan kesalahan 1,45% dibandingkan dengan data lapangan. Dimana semakin besar tekanan operasi kolom maka persen efisiensi kolom menjadi semakin rendah. Hal ini berbanding terbalik dengan pengaruh laju steam dan temperatur *rich solution*. Semakin besar laju steam ataupun temperatur *rich solution* maka efisiensi kolom menjadi semakin besar.

Daftar Pustaka

- Ahad, G., Shahhosseini Mohammad, S.G.M. (2011) Experimental Investigation of reactive absorption of Ammonia and Carbon Dioxide by Carbonated Ammonia Solution, *Iran Journal Chemical Engineering*, 30, 43-50.
- Ahmad, M., Masohan, A., Sawhney, S.S. (2014) Alkanolmonoamines as Activators for the Hot Potash Process for CO₂ Capture, *Asian Journal of Chemistry*, 26, 975-980.
- Altway, A., Susianto, S., Suprpto, S., Nurkhamidah, S., Nisa, N.I.F., Hardiyanto, F., Mulya, H.R., Altway, S. (2015) Modeling and Simulation of CO₂ Absorption into Promoted Aqueous Potassium Carbonate Solution in Industrial Scale Packed Column, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, 10 (2), 111-124.
- Badiei, M., Asim, N., Yarmo, M.A., Jahim, J.M., Sopian, K. (2012) Overview of Carbon Dioxide Separation Technology, *Proceedings of the IASTED International Conference Power and Energy Systems and Applications*, 146-151.
- Binous, H., Kaddeche, S., Bellagi, A. (2015) Solving Two-Dimensional Chemical Engineering Problems Using the Chebyshev Orthogonal Collocation Technique, *Computer Applications in Engineering Education*, 144-155.
- Borhani, T.N.G., Akbari, V., Hamid, M.K.A., Manan, Z.A. (2015) Rate-based Simulation and Comparison of Various

- Promoters for CO₂ Capture in Industrial DEA-promoted Potassium Carbonate Absorption Unit, *Journal Industrial Engineering Chemical*, 22, 306-316.
- Chu, S., Majumdar, A. (2012) Opportunities and Challenges For A Sustainable Energy Future, *Nature*, 488, 294-303.
- Endo, K., Nguyen, Q.S., Kentish, S.E., Steven, G.W., (2011) The Effect of Boric Acid on the Vapour Liquid Equilibrium of Aqueous Potassium Carbonate, *Fluid Phase Equilibrium*, 309, 109-113.
- Garcia, M., Knuutila, H.K., Gu, S. (2017) ASPEN PLUS Simulation Model for CO₂ Removal with MEA : Validation of Desorption Model with Experimental Data, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 4693-4701.
- Hegerl, G., Stott, P. (2014) Atmospheric Science From Past To Future Warming, *Science*, 343, 844-845.
- Howard-Grenville, J., Buckle, S.J., Hoskins, B.J., George, G. (2014) Climate Change and Management, *Academic Management Journal*, 57, 615-623.
- Hu, G., Nicholas, N.J., Smith, K.H., Mumford, K.A., Kentish, S.E., Stevens, G.W. (2016) Carbon Dioxide Absorption Into Promoted Potassium Carbonate Solutions : A Review, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 53, 28-40.
- Khalilpour, R., Mumford, K., Zhai, H., Abbas, A., Stevens, G., Rubin, E.S. (2015) Membrane-based Carbon Capture From Flue Gas: A Review, *Journal Clean Production*, 103, 286-300.
- Khan, F.M., Krishnamoorthi, V., Mahmud, T. (2011) Modeling Reactive Absorption of CO₂ in Packed Column for Post-combustion Carbon Capture Applications, *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 1600-1608.
- Kohl, A.L., Nielsen, R.B. (1997) *Gas Purification*, Gulf Publishing Company, Houston.
- Krishnaiah, D., Bono, A., Anisuzzaman, S.M., Joseph, C., Khee, T.B. (2014) Carbon Dioxide Removal by Adsorption, *Journal of Applied Sciences*, 23, 3142-3148.
- Mahmoodi, L., Darvishi, P. (2017) Mathematical Modeling and Optimization of Carbon Dioxide Stripping Tower in an Industrial Ammonia Plant, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 58, 42-51.
- Masoumi, S., Keshavarz, P., Ayatollahi, S., Mehdipour, M., Rastgoo, Z. (2013) Enhanced Carbon Dioxide Separation By Amine-Promoted Potassium Carbonate Solution In a Hollow Fiber Membrane Contactor, *Energy Fuel*, 27, 5423-5432.
- Nisa, N.I.F., Hardiyanto, F., Mulya, H.R., Altway, A., Susianto (2013) Simulasi Absorpsi Reaktif CO₂ Dalam Skala Industri Dengan Pelarut K₂CO₃ Berkatalis, *Jurnal Teknik Kimia*, 7, 66-71.
- Olajire, A.A. (2010) CO₂ Capture and Separation Technologies for End-of-pipe Applications-A Review, *Energy*, 35, 2610-2618.
- Oyenekan, B.A., Rochelle, G.T. (2009) Rate Modeling of CO₂ Stripping From Potassium Carbonate Promoted by Piperazine, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3, 121-132.
- Paul, S., Thomsen, K. (2012) Kinetics of Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Potassium Salt of Proline, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 8, 169-179.
- Rutgersson, A., Jaagus, J., Schenk, F., Stendel, M. (2014) Observed Changes and Variability of Atmospheric Parameters In The Baltic Sea Region During The Last 200 Years, *Climate Research*, 61, 177-190.
- Scholes, C.A., Ho, M.T., Wiley, D.E., Stevens, G.W., Kentish, S.E. (2013) Cost Competitive Membrane-Cryogenic Post-combustion Carbon Capture, *International Journal Green House Gas Control*, 17, 341-348.
- Soliman, M., Al-Zeghayer, Y., Ajbar, A. (2014) A Modified Orthogonal Collocation Method for Reaction Diffusion Problems, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31(4), 967-975.
- Tuinier, M.J., Hamers, H.P., Van Sint Annaland, M., (2011) Techno-Economic Evaluation of Cryogenic CO₂ Capture-A Comparison With Absorption and Membrane Technology, *International*

- Journal Green House Gas Control*, 5, 1559-1565.
- Wagener, D.H.V., Rochelle, G.T. (2011) Stripper Configurations for CO₂ Capture by Aqueous Monoethanolamine, *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 1639-1646.
- Wagener, D.H.V., Rochelle, G.T. (2011) Stripper Configurations for CO₂ Capture by Aqueous Monoethanolamine and Piperazine, *Energy Procedia*, 4, 1323-1330.
- Wagener, D.H.V., Rochelle, G.T., Chen, E. (2013) Modeling of Pilot Stripper Results for CO₂ Capture by Aqueous Piperazine, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 12, 280-287.
- Yi, F., Kui, Z.H., Wen, C.G., Shao, L., Feng, C.J. (2009) Modeling and Experimental Studies on Absorption of CO₂ by Benfield Solution in Rotating Packed Bed, *Chemical Engineering Journal*, 145, 377-384.