

EVALUASI KESETIMBANGAN KELARUTAN GAS KARBON DIOKSIDA (CO₂) DALAM PELARUT ALKANOLAMINA MENGGUNAKAN SIMULATOR PROSES

Yansen Hartanto¹, Tri Partono Adhi², Antonius Indarto²

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan
Jalan Ciumbuleuit 94 Bandung, 40141, Indonesia

²Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha no. 10, Bandung 40132, Indonesia
Email : yansen_hartanto@unpar.ac.id

Abstrak

Pemisahan gas asam seperti CO₂ pada gas alam merupakan proses yang sangat penting. Proses penghilangan CO₂ yang banyak digunakan adalah proses absorpsi kimia dengan menggunakan pelarut alkanolamina. Sistem proses ini telah diadopsi sebagai modul baku dalam banyak simulator proses komersial dengan menerapkan model kesetimbangan yang berbeda-beda. Studi ini ditujukan untuk mengevaluasi keabsahan rentang kondisi operasi dan tingkat akurasi perhitungan kesetimbangan yang dihasilkan dari simulator proses komersial yang banyak dijumpai dewasa ini. Model yang dikaji dalam studi ini mencakup model-model koefisien aktivitas seperti model Kent-Eisenberg, Li-Mather, dan Elektrolit Non Random Two Liquid (NRTL). Evaluasi dilakukan dengan melakukan analisis perbandingan hasil simulasi dengan serangkaian data percobaan yang telah umum digunakan sebagai rujukan. Selain itu, uji validasi simulasi proses absorpsi juga dilakukan dengan perbandingan profil temperatur kolom. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan terlihat bahwa model elektrolit NRTL memiliki tingkat akurasi yang paling baik.

Kata Kunci : Kent-Eisenberg, Li-Mather, NRTL, kesetimbangan, alkanolamina, CO₂

Abstract

Acid gas removal to remove carbon dioxide (CO₂) in natural gas is one of the most important processes. The common removal process of CO₂ from natural gas by using alkanolamine solution. This process was adopted as basic module in commercial process simulation tools with various equilibrium models. Thus, this study was focused to evaluate the validity in certain operating condition and equilibrium model that produced by commercial simulation tools. The model in this study included coefficient activity model based on Kent-Eisenberg, Li-Mather, and Electrolyte Non Random Two Liquid (NRTL). The evaluation was conducted by doing analysis from simulation result and experiment data that have been used as reference. Furthermore, validation test in absorption process simulation was done to compare column temperature profile. The overall conclusions show that electrolyte NRTL gives the most accurate result.

Keywords : Kent-Eisenberg, Li-Mather, NRTL, equilibrium, alkanolamine, CO₂

Pendahuluan

Gas alam merupakan salah satu sumber energi yang banyak digunakan di dalam berbagai industri. Gas alam umumnya mengandung berbagai macam kontaminan seperti H₂S, CO₂, CS₂, RSH, COS, N₂, NO₂, dan H₂O. Agar memiliki nilai jual yang tinggi, gas alam harus diproses terlebih dahulu untuk memenuhi beberapa spesifikasi tertentu, salah satunya yaitu spesifikasi kandungan CO₂ dan H₂S. Kedua komponen gas ini harus dihilangkan karena dapat mengganggu dalam pemanfaatan dan transmisinya. Jika bercampur dengan air, gas CO₂ akan membentuk asam yang bersifat korosif dan dapat merusak sistem perpipaan. Keberadaan karbon dioksida di gas alam juga dapat menurunkan nilai panas (*heating value*), menambah biaya kompresi, dan dapat meracuni

katalis. Selain itu, CO₂ juga akan membeku pada temperatur rendah [7].

Secara umum proses penyingkiran gas CO₂ dari gas alam dilakukan melalui proses absorpsi dengan menggunakan kontaktor gas-cair. Kontaktor yang biasa digunakan adalah kolom isian (*packed column*) dan kolom baki (*tray column*). Sedangkan pelarut yang paling banyak digunakan yaitu pelarut kimia alkanolamina (seperti MEA, DEA, MDEA, dll), dalam bentuk pelarut tunggal maupun campuran, serta diperkuat dengan promotor/aktivator untuk meningkatkan laju absorpsi CO₂ [11].

Proses absorpsi berbasis pelarut alkanolamina ini telah diadopsi sebagai modul baku dalam banyak simulator proses komersial dengan menerapkan model kesetimbangan yang berbeda-beda. Untuk fasa uap/gas dapat

digunakan persamaan keadaan Soave Redlich Kwong (SRK) atau Peng Robinson (PR). Sedangkan di fasa cair digunakan model-model koefisien aktivitas seperti model *Kent-Eisenberg*, *Li-Mather*, dan *Electrolyte Non Random Two Liquid (NRTL)*.

Penelitian awal dalam bentuk simulasi terhadap proses absorpsi CO₂ ini diperlukan untuk membantu memprediksi, merancang, dan mengevaluasi proses sesungguhnya. Di dalam simulasi ini diperlukan model yang dapat merepresentasikan kesetimbangan CO₂ dalam pelarut alkanolamina, baik pada alkanolamina tunggal, maupun pada campuran alkanolamina dengan promotor/aktivator.

Makalah ini memaparkan hasil kajian dalam menentukan model koefisien aktivitas yang dapat merepresentasikan kesetimbangan uap-cair CO₂ pada pelarut alkanolamina MEA dan MDEA. Kajian dilakukan dengan mengevaluasi keabsahan rentang kondisi operasi dan tingkat akurasi perhitungan kesetimbangan yang dihasilkan dari simulator proses komersial bila dibandingkan dengan hasil percobaan. Simulasi dalam kajian ini dilakukan dengan menggunakan paket program (simulator) Aspen Plus dan Aspen Hysys.

Teori

Absorpsi adalah proses terlarutnya komponen fasa gas dalam fasa cair. Fenomena yang mendasari proses absorpsi ini adalah kesetimbangan CO₂ di fasa gas dengan di fasa cairan. Proses absorpsi dapat terjadi karena peristiwa fisik atau melibatkan reaksi kimia.

Mekanisme perpindahan massa diawali dari perpindahan CO₂ dari fasa gas ke fasa cair melalui lapisan tipis secara difusi. Perpindahan massa di fasa gas disebabkan oleh tenaga penggerak berupa beda tekanan parsial antara komponen di fasa curah gas dengan lapisan tipis.

$$N_A = k_G(p - p_i) \quad (1)$$

k_G adalah koefisien perpindahan massa pada fasa gas.

Perpindahan massa di fasa cair didasari oleh tenaga penggerak berupa beda konsentrasi antara konsentrasi komponen di lapisan tipis dengan fasa curah cairan.

$$N_A = k_L^0(a_i - a_o) \quad (2)$$

k_L^0 adalah koefisien perpindahan massa fasa cair.

Untuk absorpsi yang melibatkan reaksi kimia, perpindahan massa di fasa cairnya dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$N_A = Ek_L^0(a_i - a_o) \quad (3)$$

E adalah *enhancement factor*, yaitu perbandingan antara perpindahan massa yang disertai reaksi kimia dengan perpindahan massa tanpa reaksi kimia. Selama sistem belum mencapai kesetimbangan, perpindahan secara difusi dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah terus berlanjut. Jumlah maksimum kandungan gas yang dapat larut pada kondisi setimbang disebut kelarutan. Suatu larutan yang tidak dapat lagi melarutkan gas pada kondisi temperatur dan tekanan tertentu disebut larutan jenuh [7].

Pelarut alkanolamina dapat digolongkan menjadi 3 macam, yaitu:

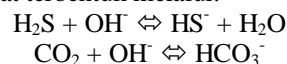
- Amina primer, yaitu amina yang memiliki dua atom hidrogen dan satu gugus alkil yang terikat pada atom N. Contohnya yaitu mono etanol amina (MEA) dan diglikol amina (DGA).
- Amina sekunder, yaitu amina yang memiliki satu atom hidrogen dan dua gugus alkil yang terikat pada atom N. Contohnya yaitu dietanol amina (DEA) dan diisopropanol amina (DIPA)
- Amina tersier, yaitu amina yang memiliki tiga gugus alkil yang terikat pada atom N. Contohnya metil dietanol amina (MDEA) dan trietanol amina (TEA)

Secara umum, reaksi antara gas CO₂ dan H₂S dengan alkanolamina terdiri dari [11]:

- 1) Ionisasi dan hidrolisis H₂S dan CO₂

$$\text{H}_2\text{S} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HS}^- \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{S}^{2-}$$

$$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$$
Reaksi disosiasi pembentukan S²⁻ dan CO₃²⁻ memiliki konstanta kesetimbangan yang kecil (10⁻¹⁴) sehingga dapat diabaikan. Pada kondisi basa, ion bisulfida dan bikarbonat juga dapat terbentuk melalui:



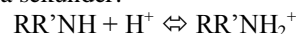
- 2) Protonasi larutan amina

Protonasi pada:

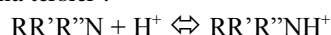
- Amina primer :



- Amina sekunder:



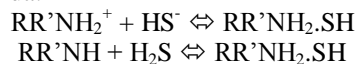
- Amina tersier :



Konstanta kesetimbangan pada larutan amina dengan struktur molekul sederhana lebih besar. Namun, pH yang tinggi membatasi konsentrasi RNH₃⁺ sehingga tidak terlalu ada perbedaan jumlah konversi antar jenis amina dalam reaksi ini.

- 3) Reaksi dengan H₂S

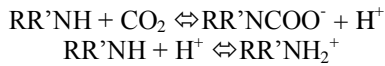
Mekanisme reaksi paralel dengan ion bisulfida:



Kedua reaksi tersebut cepat sehingga membatasi reaksi dengan senyawa sulfida:
 $2RR'NH_2 + S^{2-} \rightleftharpoons (RR'NH_2)_2S$

4) Reaksi dengan CO₂

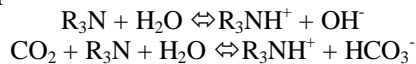
Mekanisme reaksi CO₂ dengan alkanolamina primer dan sekunder:



CO₂ bereaksi secara langsung dengan alkanolamina primer dan sekunder untuk membentuk asam karbamat. Secara keseluruhan, reaksi pada alkanolamina primer dan sekunder ini dapat ditulis sebagai berikut:

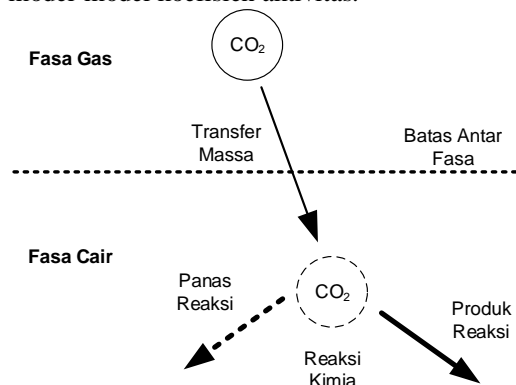


Pada alkanolamina tersier, CO₂ bereaksi secara tidak langsung dengan larutan alkanolamina. Dengan keberadaan air, maka akan terbentuk bikarbonat dan alkanolamina terprotonasi.



Model Kesetimbangan Kelarutan Gas

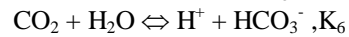
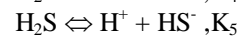
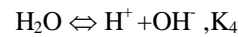
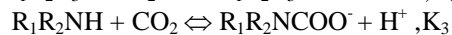
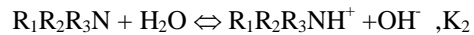
Pada kesetimbangan kelarutan gas CO₂ dalam alkanolamina, koefisien fugasitas di fasa uap/gas ditentukan dengan menggunakan persamaan keadaan yang umum digunakan seperti Soave Redlich Kwong (SRK) atau Peng Robinson (PR). Sedangkan di fasa cair digunakan model-model koefisien aktivitas.



Gambar 1. Skema Kesetimbangan Kelarutan Gas CO₂ dalam Pelarut Alkanolamina

Model Kent-Eisenberg

Model Kent-Eisenberg dapat digunakan untuk memprediksi kesetimbangan CO₂ dan H₂S di dalam larutan amina. Prediksi konstanta kesetimbangan melibatkan sistem persamaan non linear dari kesetimbangan fasa dan kesetimbangan kimia, serta neraca massa di fasa cair [4]. Reaksi yang terjadi antara CO₂ dan H₂S dengan pelarut alkanolamina berdasarkan model Kent-Eisenberg ini yaitu:



Untuk kesetimbangan fasa H₂S dan CO₂ dalam larutan alkanolamina dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$y_i \Phi_i^V P = H_i x_i \quad (4)$$

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa kesetimbangan fasa belum mempertimbangkan koefisien aktivitas di fasa cairan. Pada model ini, nilai koefisien aktivitas untuk setiap komponen bernilai 1 sehingga eksese energi bebas Gibbs (g^E) dapat dinyatakan:

$$\frac{g^E}{RT} = 0 \quad (5)$$

Sedangkan koefisien aktivitas untuk komponen i dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\ln \gamma_i = 0 \quad (6)$$

Model Li-Mather

Model Li-Mather mempunyai kemampuan yang sangat baik dalam memprediksi kesetimbangan CO₂ pada berbagai rentang temperatur, tekanan, *loading*, dan konsentrasi alkanolamina. Model ini juga dapat memprediksi untuk campuran dua macam alkanolamina dari larutan amina seperti MEA, DEA, TEA, MDEA, DGA, dan DIPA. Kesetimbangan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$y_i \Phi_i^V P = H_i x_i \gamma_i^L \quad (7)$$

Koefisien fugasitas dihitung dengan menggunakan persamaan keadaan gas, sedangkan koefisien aktivitas dihitung dengan menggunakan persamaan Clegg-Pitzer. Pada model Clegg-Pitzer ini, setiap spesies pada sistem dipertimbangkan sebagai partikel yang saling berinteraksi [4].

Elektrolit NRTL

Perhitungan koefisien aktivitas pada model elektrolit NRTL ini berdasarkan pada eksese energi bebas Gibbs dengan memperhitungkan interaksi antar molekul atau ion diantara semua komponen di fasa cairan. Energi bebas ini merupakan penjumlahan dari dua faktor, yaitu : *short range interaction* (interaksi lokal) yang merupakan interaksi antara ion-molekul, ion-ion, dan molekul-molekul yang saling berdekatan,

serta *long range interaction* pada ion-ion yang berjauhan seperti dituliskan dalam persamaan berikut [4].

$$g^{ex*} = g^{ex*,LR} + g^{ex*,local} \quad (8)$$

Untuk kontribusi dari *long range interaction* digunakan persamaan Pitzer-Debye-Huckel (PDH). Pada model ini juga ditambahkan satu faktor lagi yaitu faktor Born untuk menyesuaikan kondisi referensi yang digunakan sebagai acuan pada persamaan di atas.

$$g_{BORN}^{ex*} = RT \left(\frac{e^2}{2kT} \right) \left(\frac{1}{D_s} - \frac{1}{D_w} \right) \left(\sum \frac{x_i z_i^2}{r_i} \right) 10^{-2} \quad (9)$$

Dengan D_s merupakan konstanta dielektrik untuk campuran pelarut, dan D_w merupakan konstanta dielektrik untuk air murni. Jumlah dari kontribusi PDH dan faktor Born inilah yang menentukan dari eksese energi bebas Gibbs untuk *long range interaction*. Untuk kontribusi interaksi lokal diturunkan dari persamaan *non random two liquid* (NRTL). Koefisien aktivitas untuk molekul atau ion dapat dituliskan :

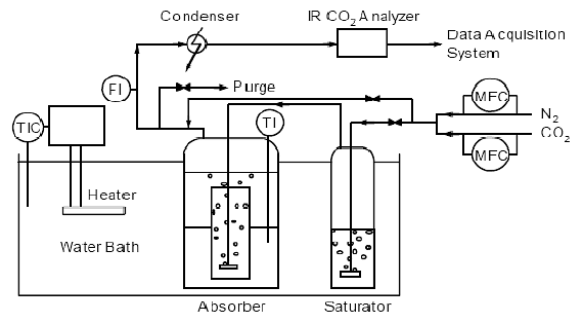
$$\ln \gamma_i = \left[\frac{\partial \left(\frac{n_i g^{ex*}}{RT} \right)}{\partial n_i} \right]_{T,P,n_{j \neq i}} \quad (10)$$

Di mana total eksese energi bebas Gibbs dapat diperoleh dari persamaan berikut.

$$g^{ex*} = g_{PDH}^{ex*} + g_{BORN}^{ex*} + g_{NRTL}^{ex*} \quad (11)$$

Metodologi Penelitian

Penelitian ini diawali dengan pencuplikan data kesetimbangan CO_2 pada berbagai macam pelarut alkanolamina pada berbagai rentang konsentrasi dan temperatur. Pelarut yang dikaji yaitu MEA dan MDEA. Konsentrasi MEA yang dikaji yaitu 2,5 M pada temperatur 40°C dan 80°C . Untuk MDEA digunakan konsentrasi 2 M dan 4,28 M pada temperatur 40°C . Data kesetimbangan yang dihasilkan berupa tekanan parsial CO_2 di fasa gas untuk *loading* CO_2 (perbandingan mol CO_2 dengan mol pelarut alkanolamina) tertentu. Data ini diambil dari beberapa jurnal yang relevan. Data kesetimbangan ini akan digunakan sebagai validasi model-model koefisien aktivitas yang dikaji pada penelitian ini. Secara sederhana, peralatan yang digunakan dalam percobaan penentuan kesetimbangan CO_2 disajikan dalam Gambar 2 berikut.

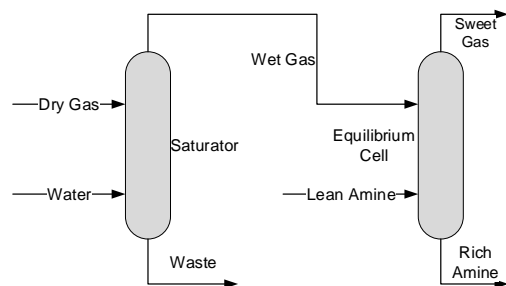


Gambar 2. Skema Peralatan Penentuan Kesetimbangan CO_2 [3]

Simulasi Model Kesetimbangan CO_2 pada Pelarut Alkanolamina

Model kesetimbangan CO_2 ini dibuat melalui simulasi dengan menggunakan beberapa simulator untuk setiap model koefisien aktivitas yang dikaji pada penelitian ini, yaitu *Kent-Eisenberg*, *Li-Mather*, dan elektrolit NRTL.

Pada simulasi ini, gas CO_2 dilewatkan dalam sebuah *saturator* yang berisi air untuk menjenuhkan gas CO_2 tersebut dengan air. Kemudian gas ini dikontakkan dengan pelarut alkanolamina hingga jenuh pada sebuah *equilibrium cell*. Data yang diamati berupa tekanan parsial CO_2 di fasa gas dan *loading* CO_2 di fasa cairan. Data yang diperoleh dari simulasi ini dibandingkan dengan data percobaan yang diperoleh dari jurnal agar diketahui model mana yang dapat merepresentasikan kesetimbangan CO_2 pada alkanolamina dengan paling baik. Simulasi penentuan kesetimbangan CO_2 ini secara sederhana disajikan dalam Gambar 3 berikut.

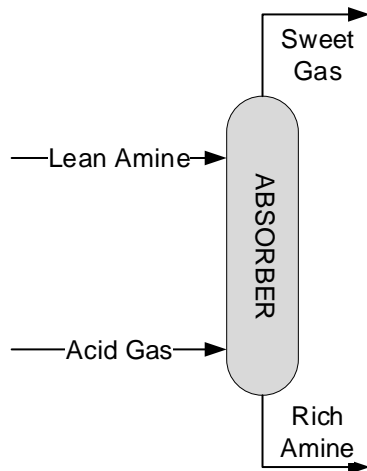


Gambar 3. Model Simulasi Penentuan Kesetimbangan CO_2

Simulasi dan Validasi Proses Absorpsi CO_2

Simulasi proses absorpsi CO_2 pada sebuah absorber dilakukan dengan menggunakan beberapa simulator komersial untuk setiap model koefisien aktivitas yang digunakan. Pada simulasi ini, umpan yang berupa gas alam dengan konsentrasi CO_2 tertentu dikontakkan dengan pelarut alkanolamina (*lean amine*) pada sebuah absorber. Gas keluar absorber akan

memiliki konsentrasi CO_2 yang rendah, sedangkan alkanolamina yang keluar dari absorber akan memiliki konsentrasi (*loading*) CO_2 yang tinggi. Profil temperatur yang dihasilkan dari simulasi akan dibandingkan dengan data literatur. Simulasi proses absorpsi CO_2 ini disajikan dalam Gambar 4 berikut.

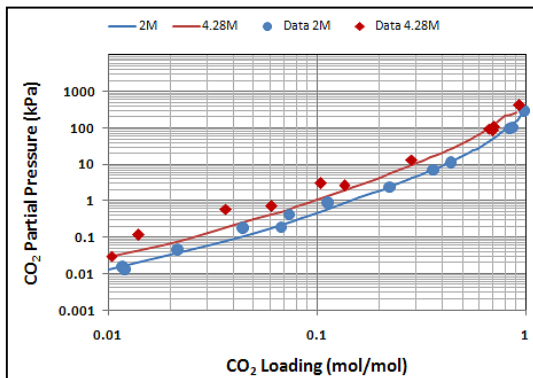


Gambar 4. Simulasi Proses Absorpsi CO_2

Hasil

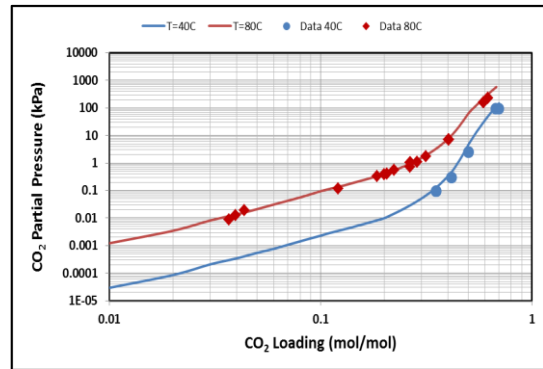
Evaluasi Model Kent-Eisenberg

Penentuan kesetimbangan CO_2 menggunakan model Kent-Eisenberg dilakukan dengan bantuan simulator Aspen Hysys. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan alkanolamina tunggal (MEA dan MDEA). Hasil evaluasi model Kent-Eisenberg disajikan dalam Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Kesetimbangan CO_2 -MDEA pada 40°C (Kent-Eisenberg)

Dari Gambar 5 di atas terlihat bahwa model Kent-Eisenberg memiliki penyimpangan yang cukup besar untuk konsentrasi 4,28 M. Sedangkan untuk konsentrasi yang lebih rendah (2 M) terlihat bahwa model ini memiliki tingkat akurasi yang lebih baik.

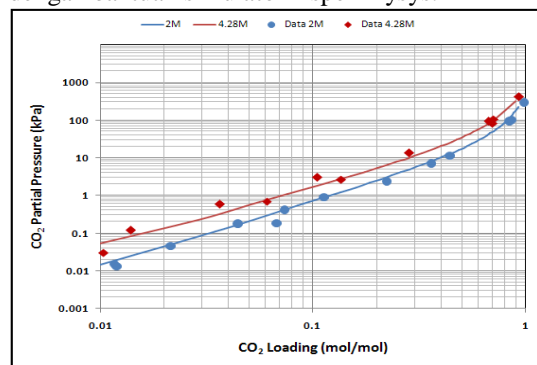


Gambar 6. Kesetimbangan CO_2 -MEA 2.5 M (Kent-Eisenberg)

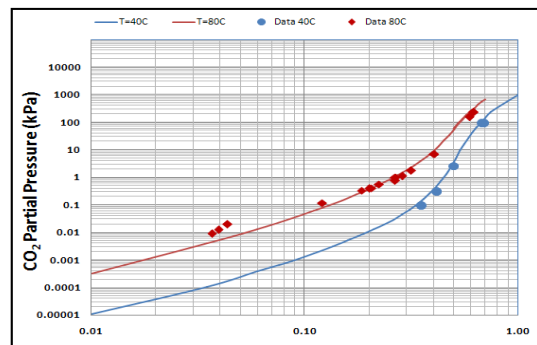
Untuk pelarut MEA (Gambar 6) terlihat bahwa model Kent-Eisenberg memiliki akurasi yang baik.

Evaluasi Model Li-Mather

Penentuan kesetimbangan CO_2 menggunakan model Li-Mather juga dilakukan dengan bantuan simulator Aspen Hysys.



Gambar 7. Kesetimbangan CO_2 -MDEA pada Temperatur 40°C (Li-Mather)



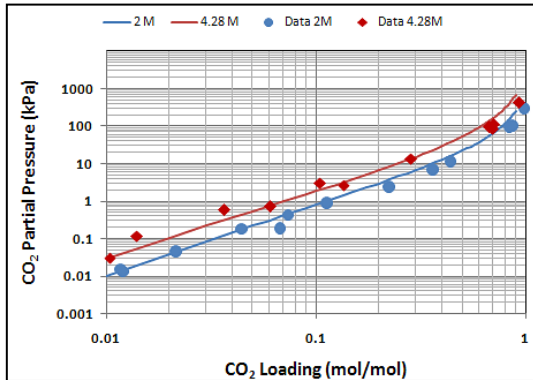
Gambar 8. Kesetimbangan CO_2 -MEA 2.5 M (Li-Mather)

Untuk kesetimbangan CO_2 pada MDEA terlihat bahwa model Li-Mather memiliki akurasi yang lebih baik jika dibandingkan dengan model Kent-Eisenberg. Pada sistem CO_2 -MEA juga terlihat bahwa model ini juga dapat

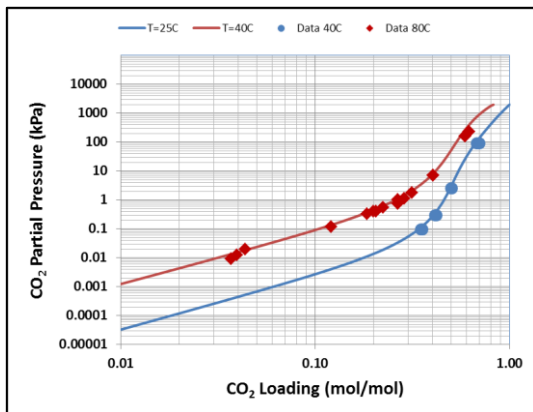
merepresentasikan data kesetimbangan CO_2 dengan baik.

Evaluasi Model Elektrolit NRTL

Penentuan kesetimbangan CO_2 menggunakan model Elektrolit NRTL dilakukan dengan bantuan simulator Aspen Plus.



Gambar 9. Kesetimbangan CO_2 -MDEA pada 40°C (Elektrolit NRTL)



Gambar 10. Kesetimbangan CO_2 -MEA 2.5 M (Elektrolit NRTL)

Untuk kesetimbangan CO_2 pada MEA dan MDEA terlihat bahwa model Elektrolit NRTL ini dapat merepresentasikan hasil kesetimbangan dengan sangat baik.

Simulasi dan Validasi Proses Absorpsi CO_2

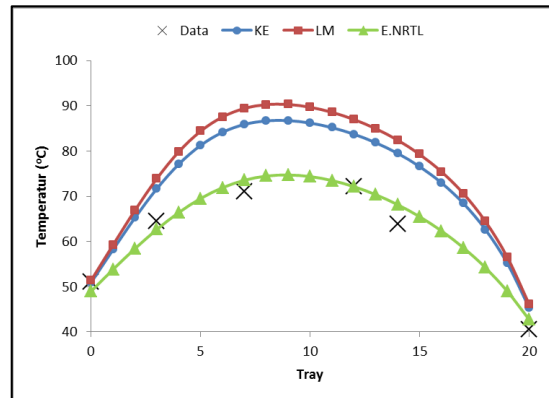
Absorpsi CO_2 pada sebuah absorber dilakukan dengan menggunakan spesifikasi umpan yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Umpan Absorber [2]

Variabel	Gas In	Lean Amine
Temperatur(K)	305,37	317,04
Tekanan(bar)	55,158	55,158
Laju alir(mol/s)		
H ₂ O	0,399	238,26
MDEA	0	17,75
CO ₂	15,83	0,1038
H ₂ S	0,0256	0,00158
CH ₄	440,03	0

Absorber yang digunakan berupa kolom tray dengan jumlah tray sebanyak 21. Perhitungan absorber pada simulator Aspen Plus menggunakan *rate-based approach* sedangkan pada Aspen Hysys menggunakan *equilibrium approach*.

Validasi absorber dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data percobaan yang berupa profil temperatur fasa cairan pada tiap tray.



Gambar 11. Profil Temperatur Fasa Cairan pada Absorber

Model berdasarkan Kent-Eisenberg dan Li-Mather menghasilkan profil temperatur yang menyimpang jauh daripada hasil eksperimen. Sedangkan model elektrolit NRTL membuktikan keabsahan untuk simulasi absorber.

Kesimpulan

Dari evaluasi kesetimbangan CO_2 pada alkanolamina, model elektrolit NRTL memiliki tingkat akurasi yang paling tinggi jika dibandingkan dengan model-model koefisien aktivitas yang lain. Pada model elektrolit NRTL ini, perhitungan koefisien aktivitas dilakukan dengan memperhitungkan gaya interaksi yang terjadi pada larutan elektrolit, yaitu *long range interaction*, *short range interaction*, dan melibatkan faktor koreksi terhadap pelarut alkanolamina yang digunakan. Untuk simulasi proses absorpsi CO_2 pada kolom absorber, model elektrolit NRTL juga memberikan tingkat keabsahan yang paling baik. Hal ini dapat dilihat dari profil temperatur yang paling mendekati data literatur. Pendekatan perhitungan berdasarkan laju reaksi (*rate-based approach*) juga memberikan peran besar pada tingkat akurasi hasil simulasi absorpsi ini.

Daftar Simbol

P = tekanan total
 R = konstanta gas
 T = suhu operasi
 D = konstanta dielektrik pelarut

e	= elektron
g^E	= eksess energi bebas Gibbs
k	= konstanta Boltzman
x_i	= fraksi mol komponen i di fasa cairan
y_i	= fraksi mol komponen i di fasa gas
z	= nilai absolut muatan ion
γ	= koefisien aktivitas
Φ	= koefisien fugasitas

Daftar Pustaka

- [1]. Al-Baghli N.A., Pruess S.A., Yesavage V.F., Selim M.S., A Rate-based Model for Design of Gas Absorbers for The Removal of CO₂ and H₂S using Aqueous Solutions of MEA and DEA, Fluid Phase Equilibria, 2001,185,31-43
- [2]. Daviet. G. R., Sundermann R., Donelly S. T., Bullin J. A., Dome's North Caroline Plant Conversion to MDEA, Proceedings of Gas Processors Association Convention, New Orleans. LA. 69 (1984)
- [3]. D.M. Austgen, G.T. Rochelle, Chau-Chyun Chen, Model of Vapor-Liquid Equilibria for Aqueous Acid Gas-Alkanolamine Systems. 2. Representation of H₂S and CO₂ Solubility in Aqueous MDEA and CO₂ Solubility in Aqueous Mixture of MDEA with MEA or DEA, Industrial and Engineering Chemistry Research, 30, (1991) 543-555.
- [4]. D.M. Austgen, G.T. Rochelle, Xiao Peng, Chau-Chyun Chen, Model of Vapor-Liquid Equilibria for Aqueous Acid Gas-Alkanolamine Systems Using the Electrolyte-NRTL Equation, Industrial and Engineering Chemistry Research, 28, (1989) 1060-1073.
- [5]. Ebenezer, Salako., Removal of Carbon Dioxide from Natural Gas for LNG Production, NTNU, Trondheim, Norway, 2005.
- [6]. Ezra E. Isaacs, Fred D. Otto, dan Alan E. Mather, Solubility of Mixtures of H₂S and CO₂ in a Monoethanolamine Solution at Low Partial Pressures, Journal of Chemical Engineering Data, 25, (1980) 118-120
- [7]. Faulkner,LL, Fundamentals of Natural Gas Processing, CRC Press, New York, 2006.
- [8]. F.Y. Jou, Fred D. Otto, dan Alan E. Mather, Solubility of H₂S and CO₂ in Aqueous Methyldiethanolamine Solutions, Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development, 21, (1982) 539-544
- [9]. Garry, J and Handwerk,G., Petroleum Refining Technology and Economics, 4th ed, Marcell Decker, New York, 2001.
- [10]. Geankoplis C.J, Transport Processes and Unit Operations, 3rd ed, Prentice Hall Inc, New Jersey, 1993.
- [11]. Giovanni Astarita, David Savage, and Attilio Bisio., Gas Treating with Chemical Solvents, John Wiley & Sons, New York, 1983.
- [12]. Green, Don and Perry, Robert, Perry's Chemical Engineers Handbook, 8th ed, Mc Graw Hill, USA, 2008.
- [13]. Guo, Buyon and Ghalamdor, Ali, Natural Gas Engineering Handbook, Gulf Publishing, Houston, 2005.
- [14]. J. David Lawson dan A. W. Garst, Gas Sweetening Data: Equilibrium Solubility of Hydrogen Sulfide and Carbon Dioxide in Aqueous Monoethanolamine and Aqueous Diethanolamine Solutions, Journal of Chemical Engineering Data, 21, (1973) 20-30
- [15]. J.I. Lee, Fred D. Otto, dan Alan E. Mather, The Solubility of H₂S and CO₂ in Aqueous Monoethanolamine Solutions, The Canadian Journal of Chemical Engineering,52, (1974) 803-805
- [16]. Jones,David and Pujado,Peter., Handbook of Petroleum Processing, Springer, Netherland, 2006.
- [17]. Kohl, Arthur and Nielsen, Richard., Gas Purification, 5th ed, Gulf Publishing Company, Texas, 1997
- [18]. Maddox, Robert., Gas Conditioning and Processing, 3rd ed, Vol 1, 2, 3, 4, Campbell Petroleum Series, Oklahoma,1982
- [19]. Manning, F and Thompson, R., Oil Field Processing of Petroleum, Volume I: Natural Gas, Penn Well Books, Oklahoma, 1991.
- [20]. Saeid Mokhataeb, William Poe, and James Speight, Handbook of Natural Gas Transmission and Processing, Elsevier, USA, 2006
- [21]. Warren Mc Cabe, Julian Smith, and Peter Harriot, Unit Operations of Chemical Engineering, 5th ed, Mc Graw Hill, New York, 1925.
- [22]. Younger, AH, Natural Gas Processing Principles and Technology, University of Calgary, Alberta, 2004.