

ABSORPSI CO₂ DARI CAMPURANNYA DENGAN CH₄ ATAU N₂ MELALUI KONTAKTOR MEMBRAN SERAT BERONGGA MENGGUNAKAN PELARUT AIR

Sutrasno Kartohardjono, Anggara, Subihi, dan Yuliusman

Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

E-mail: sutrasno@che.ui.edu

Abstrak

Belakangan ini, kontaktor membran serat berongga mulai banyak digunakan sebagai kontaktor gas-cair yang diantaranya adalah dalam proses penyerapan CO₂ dari aliran gas. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas kontaktor membran serat berongga untuk absorpsi CO₂ dari campurannya dengan CH₄ atau N₂ menggunakan pelarut air melalui uji perpindahan massa dan uji hidrodinamika air. Ada tiga buah modul membran yang digunakan pada penelitian ini yang berdiameter 1.9 cm, panjang 40 cm dengan jumlah serat masing-masing 10, 15 dan 20 buah dan diameter luarnya 2.7 mm. Variabel operasi yang digunakan pada penelitian ini adalah laju alir pelarut yang melalui kontaktor membran serat berongga. Hasil studi memperlihatkan bahwa koefisien perpindahan massa pada kontaktor membran berbanding lurus dengan laju alir pelarut dan berbanding terbalik dengan jumlah serat yang terdapat di dalam kontaktor membran. Dari hasil penelitian, didapat bahwa pada perpindahan massa yang terjadi, dinyatakan dengan fluks perpindahan CO₂ ke dalam air dapat mencapai sekitar $1,4 \times 10^{-9}$ mol CO₂ /m².det dan koefisien perpindahan massanya dapat mencapai $1,23 \times 10^{-7}$ m/det. Sementara itu, hasil uji hidrodinamika memperlihatkan bahwa penurunan tekanan air di dalam kontaktor berbanding lurus dengan jumlah serat dan laju alir pelarut di dalam kontaktor.

Abstract

CO₂ Absorption from Its Mixture with CH₄ or N₂ through Hollow Fiber Membrane Contactor using Water as Solvent. Hollow fiber membrane contactors have been widely used as gas-liquid contactors recently such as in the CO₂ absorption process from gas stream. This research aims to evaluate the effectiveness of hollow fiber membrane contactor to absorb CO₂ from its mixture with CH₄ or N₂ using water through mass transfer and hydrodynamic tests. There are 3 membrane modules used in this research with shell diameter of 1.9 cm, length of 40 cm, outer fiber diameter of 2.7 mm and fiber number in the contactors of 10, 15 and 20. Liquid flow rates in the hollow fiber membrane contactors are varied in this research. Research results show that mass transfer coefficients in the membrane contactor increase with increasing liquid flow rate and decrease with increasing fiber number in the contactor. Flux of CO₂ into water can achieve 1.4×10^{-9} mol CO₂ /m².s and mass transfer coefficients can achieve 1.23×10^{-7} m/s. Meanwhile, hydrodynamic test results show that water pressure drop in the membrane contactors increase with increasing fiber number in the contactors.

Keywords: hollow fiber, contactor, mass transfer

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara di dunia yang mempunyai cadangan gas alam yang cukup besar. Selain komponen hidrokarbon, di dalam gas alam juga terkandung beberapa kontaminan seperti uap air, N₂, CO₂, dan H₂S, dengan kadar CO₂ dan uap air relatif lebih besar dibandingkan N₂ dan H₂S. Gas CO₂ dan H₂S sering dinamakan sebagai gas asam (*acid gas*), karena sifatnya yang asam, dengan derajat keasaman lebih tinggi H₂S. Karena sifat asamnya ini, CO₂ dan H₂S

tergolong gas pengotor yang sangat merugikan. Gas-gas tersebut bersifat korosif dan dapat merusak bagian dalam utilitas pabrik dan sistem perpipaannya, terutama sekali H₂S, yang dengan komposisi sangat sedikit saja (dalam ppm), daya korosifnya sudah sangat tinggi.

Gas CO₂ akan bersifat korosif jika di dalam gas alam terkandung uap air yang dapat mengasamkan CO₂ menjadi H₂CO₃. Sifat korosif CO₂ akan muncul pada daerah-daerah yang menyebabkan penurunan temperatur dan tekanan, seperti pada bagian *elbow* pipa,

tubing-tubing, *cooler*, dan injektor turbin. Sebagai contoh di dalam fasilitas turbin gas, CO₂ akan mengakibatkan penurunan nilai kalor pembakaran karena CO₂ dan H₂O merupakan produk dari pembakaran, sehingga CO₂ dan H₂O tidak dapat dibakar. Menurunnya kalor pembakaran akan mengurangi tegangan listrik yang dihasilkan oleh turbin gas tadi. Contoh lain misalnya dalam proses pencairan gas alam, CO₂ bersifat merugikan, karena pada suhu sangat rendah CO₂ akan menjadi padat (*icing*), sehingga mengakibatkan tersumbatnya sistem perpipaan dan merusak *tubing-tubing* pada alat penukar panas utama (*main heat exchanger*) [1].

Secara konvensional, proses penghilangan CO₂ di industri dilakukan dengan proses gas absorpsi yang berskala besar. Campuran gas tersebut dikontakkan dengan pelarut absorben didalam alat seperti *packed towers*, *spray towers*, *venture towers*, dan *sieve-tray towers*. Sedangkan tipe dari alat scrubber yang lain seperti *buble* dan *foam coloumn*. Pada kolom konvensional ini, kontak antara fasa gas dan fasa cair terjadi secara langsung sehingga memungkinkan terjadinya dispersi antar fasa. Kelemahan yang terjadi pada *packed towers*, *buble* dan *foam coloumn* adalah memiliki laju alir yang satu arah (*cocurrent*) sehingga laju perpindahan massa yang terjadi tidak lebih baik dari kondisi kesetimbangan. Sedangkan untuk laju alir yang berlawanan (*countercurrent*) seperti yang terjadi pada *packed towers* dan juga *sieve-tray towers* dapat terjadi peluapan (*flooding*) jika laju alir gas terlalu besar dan juga akan terjadi proses penumpukan (*loading*) jika laju alir terlalu kecil [2].

Suatu metode baru yang sekarang banyak diteliti sebagai penyerap CO₂ adalah penggunaan kontaktor gas cair membran serat berongga atau gas liquid hollow fiber membrane modules (HFMM). Banyak studi yang telah dilakukan [3,4,5] yang menggunakan modul membran serat berongga sebagai kontaktor gas cair untuk proses penyerapan gas CO₂ ke dalam berbagai pelarut. Mereka telah mempublikasikan bahwa modul membran serat berongga dapat menghasilkan gas/liquid *interfacial area* per unit volume yang lebih besar dibandingkan dengan menggunakan *packed coloumn*. Ini terjadi karena fluida yang mengalir didalam membran serat berongga selalu memenuhi rongga-rongga yang tersedia di dalam membran tersebut sehingga tidak akan ada penurunan *interfacial area* jika fluida yang mengalir sedikit dan juga *flooding phenomena* jika ada peningkatan laju alir gas yang besar.

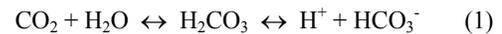
Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas kontaktor membran serat berongga sebagai kontaktor proses penyerapan CO₂ dari campurannya dengan CH₄ atau N₂ menggunakan pelarut air. Ada dua studi utama yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu studi

perpindahan massa dan hidrodinamika air di dalam kontaktor membran yang digunakan.

Dasar Teori. Absorpsi gas merupakan proses kontak antara campuran gas dan cairan yang bertujuan menghilangkan salah satu komponen gas dengan cara melarutkannya menggunakan cairan yang sesuai. Proses absorpsi ini melibatkan difusi partikel-partikel gas ke dalam cairan. Secara umum, faktor-faktor yang mempengaruhi absorpsi adalah kelarutan (*solubility*) gas dalam pelarut dalam kesetimbangan, tekanan operasi, serta temperatur. Pada umumnya, naiknya temperatur menyebabkan kelarutan gas menurun.

Salah satu metode yang kini berkembang dalam proses pemisahan CO₂ dari campuran gas adalah dengan menggunakan membran sebagai kontaktor gas-cair. Metode ini adalah pengembangan dari penggunaan membran konvensional yang selama ini lebih sering digunakan untuk proses filtrasi serta osmosis balik pada pengolahan air (*water treatment*).

Pada absorpsi gas CO₂ menggunakan pelarut air, CO₂ bereaksi dengan air melalui persamaan sebagai berikut:

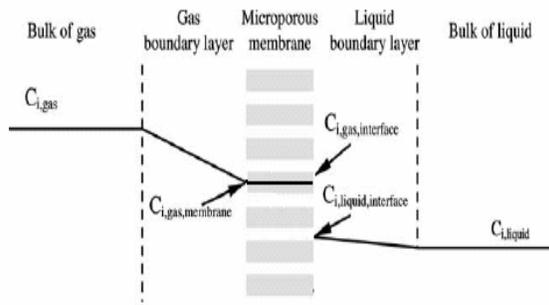


Reaksi CO₂ dengan air tersebut merupakan reaksi kesetimbangan, di mana konstanta kesetimbangannya sangat kecil sehingga pembentukan H⁺ dan HCO₃⁻ juga sangat kecil. Karena itu, proses absorpsi CO₂ dengan air lebih dinyatakan sebagai absorpsi fisika, bukan absorpsi kimia.

Kontaktor membran adalah suatu alat yang dapat mengakomodasi perpindahan massa gas-cair ataupun cair-cair tanpa adanya dispersi satu fasa ke fasa lainnya, tidak seperti kolom kontaktor konvensional. Modul membran yang umum digunakan adalah membran serat berongga (*hollow fiber*) berpori mikro (*microporous membrane*), yaitu membran dengan struktur yang rongga yang padat saling terhubung dan terdistribusi acak. Perpindahan massa antar fasa pada kontaktor membran didorong oleh adanya perbedaan konsentrasi komponen antar fasa dan penurunan tekanan yang diperlukan untuk menahan interfasa antarfluida sangat kecil. Pada proses kontak antar fluida melalui membran, langkah-langkah yang terjadi adalah [6]:

- Perpindahan massa komponen dari fluida umpan ke membran
- Difusi massa tersebut melewati membran
- Perpindahan massa dari membran ke fluida lainnya.

Proses absorpsi gas melalui membran serat berongga dapat dilihat pada Gambar 1. Apabila digunakan campuran gas CO₂ dengan gas lain maka lapisan batas pada gas akan terjadi sedikit penurunan. Selain itu,



Gambar 1. Skema Perpindahan Massa CO₂ dari Fasa Gas ke Fasa Cair [7]

karena membran yang digunakan adalah membran hidrofobik maka pori-pori membran akan terisi gas, sehingga ada juga tahanan membran untuk perpindahan gas [7]. Dengan demikian, tahanan perpindahan massa berada pada fasa cair, fasa gas dan fasa membran dan koefisien perpindahan massa dapat dinyatakan sebagai

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{Hk_G} + \frac{1}{Hk_m} + \frac{1}{k_L} \quad (2)$$

Korelasi untuk menggambarkan kinerja perpindahan massa sangat diperlukan dalam merancang kontakor membran dan sering dinyatakan dalam korelasi empirik. Variabel yang mempengaruhi perpindahan massa keseluruhan adalah kecepatan cairan v_L , viskositas μ , densitas ρ , difusivitas D , diameter kontakor d_p dan koefisien perpindahan massa di fasa cair k_L . Umumnya koefisien perpindahan massa untuk peralatan perpindahan massa dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan [8].

$$Sh \propto Re^\alpha Sc^\beta f(geometry) \quad (3)$$

Sh , Re and Sc adalah bilangan tak berdimensi yaitu bilangan Sherwood, bilangan Reynolds dan bilangan Schmidt, serta f (geometry) suatu fungsi geometri seperti d_p/l dan fraksi kepadatan membran [9]. Bilangan Sherwood, bilangan Reynolds dan bilangan Schmidt didefinisikan sebagai:

$$Sh = k_L \frac{d_e}{D} \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho v d_e}{\mu} \quad (5)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D} \quad (6)$$

Diameter ekuivalen kontakor d_e dapat dihitung melalui persamaan,

$$d_e = 4 \frac{\text{cross-sectional area}}{\text{wetted perimeter}} = \frac{d_p^2 - nd_f^2}{d_p + nd_f} \quad (7)$$

dimana d_p , d_f and n adalah diameter kontakor, diameter serat dan jumlah serat. Eksponen bilangan Reynolds α , pada Persamaan (3) merupakan indikasi rejim perpindahan massa, dimana semakin tinggi nilai α semakin bersifat turbulen aliran rejim perpindahan massa yang terjadi [10]. Sementara fluks gas yang melalui membrane dapat dihitung melalui persamaan,

$$J = k_L \Delta C \quad (8)$$

Kehilangan energi karena friksi dari suatu fluida yang mengalir melalui bagian selongsong kontakor membran serat berongga dapat dihitung menggunakan persamaan (9) dengan mempertimbangkan diameter ekuivalen kontakor seperti pada persamaan (7).

$$\Delta P = \frac{2f l \rho v_L^2}{d_e} \quad (9)$$

dimana ΔP adalah penurunan tekanan antara cairan masuk dan keluar kontakor, f adalah factor friksi, d_e adalah diameter ekuivalen kontakor, l adalah panjang kontakor, ρ adalah densitas cairan, dan v_L laju alir cairan di dalam kontakor.

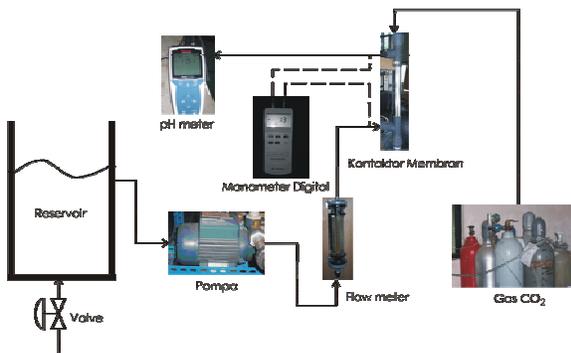
2. Metode Penelitian

Membran serat berongga yang digunakan pada penelitian ini diproduksi oleh AKZO Noble Australia berdiameter luar 2,7 mm dengan ukuran pori 0,2 μm . Ada 3 buah kontakor membran yang digunakan dengan diameter selongsongnya sekitar 1.9 cm dan panjang 40 cm dengan jumlah serat 10, 15 dan 20 buah. Skema eksperimen yang dilakukan dalam penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 2.

Untuk uji perpindahan massa, pertama kali reservoir diisi air distilasi (pH \approx 7) hingga penuh. Kemudian, ke dalam modul dialirkan campuran gas CO₂-CH₄ atau CO₂-N₂ (CO₂ = 31%) terlebih dahulu selama \pm 30 detik agar serat terisi campuran gas. Setelah itu, pelarut dialirkan ke dalam modul dengan kecepatan yang diinginkan dan perubahan konsentrasi pelarut yang melewati kontakor membran diukur melalui perubahan pH yang terjadi. Kecepatan aliran air divariasikan dari 100 hingga 350 liter/jam. Sementara itu, untuk uji hidrodinamika, aliran masuk dan keluar modul dihubungkan dengan manometer digital untuk mengukur penurunan tekanan air yang terjadi selama melewati kontakor membran serat berongga.

Koefisien perpindahan massa, K_L , yang terjadi di dalam kontakor dihitung melalui persamaan (10),

$$K_L = \frac{Q_L}{A} \ln \frac{C^* - C_0}{C^* - C_1} \quad (10)$$



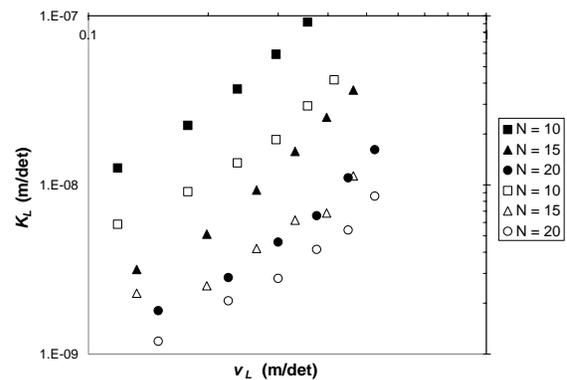
Gambar 2. Skema eksperimen proses penyerapan gas CO₂ melalui kontakor membran serat berongga.

dimana Q_L dan A adalah laju alir pelarut dan luas permukaan membran di dalam kontakor, sementara C^* , C_0 dan C_1 adalah konsentrasi CO₂ di dalam pelarut dalam keadaan setimbang, di reservoir dan di keluaran kontakor membran.

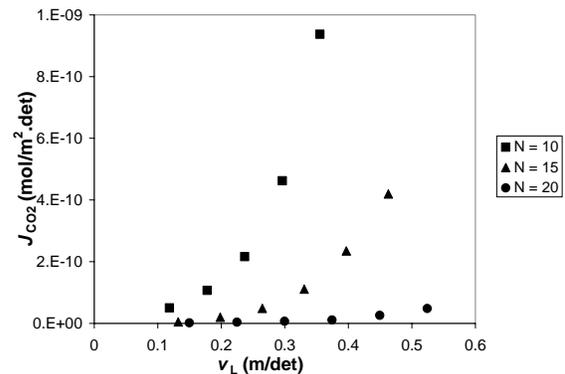
3. Hasil dan Pembahasan

Hubungan koefisien perpindahan massa CO₂ terhadap kecepatan aliran cairan yang melalui kontakor dapat dilihat pada Gambar 3. Dari gambar tersebut terlihat bahwa koefisien perpindahan massa bertambah besar dengan naiknya laju alir pelarut yang mengalir di dalam kontakor. Hal ini dikarenakan peningkatan laju alir akan meningkatkan turbulensi aliran sehingga arus Eddy yang terjadi juga akan semakin besar. Arus Eddy ini akan memperkecil hambatan yang terjadi di sekitar aliran dan memperbesar koefisien perpindahan massa [12]. Koefisien perpindahan massa CO₂ ke dalam air dapat mencapai sekitar $1,23 \times 10^{-7}$ m/det.

Dari gambar terlihat pula bahwa koefisien perpindahan massa turun dengan naiknya fraksi kepadatan membran di dalam modul untuk laju air yang sama. Semakin rendah fraksi kepadatan membran di dalam modul maka semakin baik kontak yang terjadi antara serat dengan air karena pergerakan serat di dalam modul juga semakin dinamis. Efek ini dikenal sebagai efek permukaan baru (*surface renewal effect*) yang dapat menyebabkan terjadinya peningkatan koefisien perpindahan massa di dalam modul kontakor membran serat berongga [13]. Fenomena ini menjelaskan bahwa pada modul kontakor dengan fraksi kepadatan rendah maka aliran *transversal* dan *surface renewal effect* lebih berpengaruh terhadap kemampuan perpindahan massa, sementara pada fraksi kepadatan membran yang tinggi efek channelling lebih berpengaruh karena adanya pengotor yang cukup besar pada pori-pori membran. Dengan demikian koefisien perpindahan massa CO₂ kedalam pelarut air akan semakin kecil dengan bertambahnya jumlah serat di dalam modul.



Gambar 3. Variasi koefisien perpindahan massa gas CO₂, K_L , dari campurannya dengan CH₄ (simbol tertutup) dan dengan N₂ (simbol terbuka) terhadap laju alir air, v_L .



Gambar 4. Variasi fluks gas CO₂, J_{CO_2} , dari campurannya dengan CH₄ terhadap laju alir air, v_L .

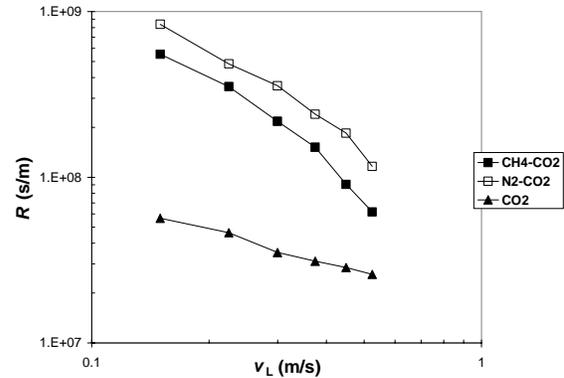
Untuk studi perpindahan massa, dapat juga dilihat melalui fluks gas CO₂. Fluks gas CO₂ dapat didefinisikan sebagai banyaknya karbon dioksida yang berpindah persatuan waktu persatuan luas membran. Gambar 4 memperlihatkan hubungan antara fluks gas CO₂ yang diserap pelarut dengan laju alir pelarut pada berbagai kontakor yang digunakan. Dari gambar tersebut terlihat bahwa fluks gas CO₂ yang diserap oleh pelarut melalui kontakor membran serat berongga, seperti halnya pada koefisien perpindahan massa, bertambah besar dengan naiknya laju alir pelarut dan turun dengan bertambahnya jumlah serat yang terdapat di dalam kontakor pada laju alir pelarut yang sama. Alasan yang dapat digunakan untuk kasus ini juga sama seperti halnya pada koefisien perpindahan massa sebab nilai fluks berbanding lurus dengan koefisien perpindahan massa seperti terlihat pada Persamaan (8). Fluks perpindahan CO₂ dari sistem gas CH₄-CO₂ ke dalam air dapat mencapai sekitar $1,4 \times 10^{-9}$ mol CO₂/m².det.

Lain halnya jika yang digunakan dalam eksperimen adalah gas CO₂ murni, maka dapat dikatakan bahwa tahanan perpindahan massa di fasa gas dan fasa membran dapat diabaikan [6], sementara bila gas yang digunakan adalah gas campuran maka tahanan perpindahan massa di fasa gas tidak dapat diabaikan. Gambar 5 memperlihatkan perbandingan tahanan perpindahan massa keseluruhan pada kontaktor yang berisi 20 buah serat bila yang digunakan adalah gas CO₂ murni dan campuran. Dari gambar tersebut dapat dilihat besarnya tahanan perpindahan massa yang terjadi memiliki perbedaan, tahanan yang dimiliki oleh campuran gas N₂-CO₂ lebih besar dibandingkan campuran gas CH₄-CO₂. Dan fenomena ini sesuai dengan apa yang diperlihatkan pada koefisien perpindahan massanya.

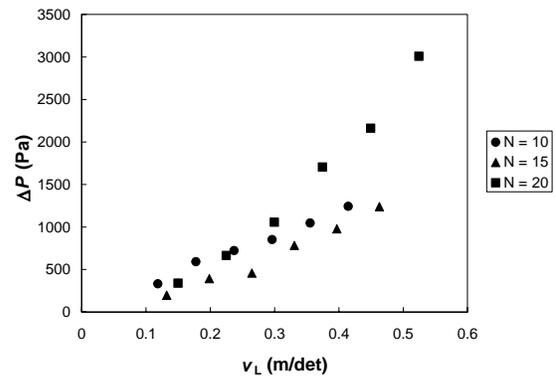
Hubungan antara penurunan tekanan cairan yang masuk dan keluar kontaktor terhadap sifat aliran yang dinyatakan dalam bilangan Reynolds dapat dilihat pada Gambar 6. Dari gambar tersebut terlihat bahwa semakin cepat aliran, perbedaan tekanan antara cairan masuk dan keluar kontaktor untuk setiap modul semakin besar. Hal ini dikarenakan aliran semakin bersifat turbulen (bilangan Reynolds semakin besar) seiring dengan meningkatnya kecepatan aliran sehingga lebih banyak gaya gesek yang terjadi dan mengakibatkan penurunan tekanan yang semakin besar. Selain itu, secara teori semakin besar jumlah serat dalam modul, relatif perbedaan tekanannya semakin besar karena gesekan yang terjadi pada serat akan semakin banyak [6].

Hubungan antara faktor friksi dan laju alir air di dalam kontaktor diperlihatkan pada Gambar 7. Dari gambar tersebut terlihat bahwa untuk setiap kontaktor dengan jumlah serat yang berbeda, hubungan friksi dengan bilangan Reynolds memiliki tren yang sama, bahwa semakin besar bilangan Reynolds, dalam hal ini laju alir air semakin besar dan aliran semakin bersifat turbulen, faktor friksi yang terjadi semakin kecil. Hal ini dikarenakan faktor friksi berbanding terbalik dengan kuadrat kecepatan aliran sebagaimana tersirat pada Persamaan (9). Dalam menentukan faktor friksi ini dinyatakan bahwa setiap fluida yang melewati saluran dengan luas penampang yang seragam memiliki gaya pada permukaan padat berupa gaya fluida itu sendiri dan gaya lain yang berkaitan dengan perilaku kinetika fluida tersebut [12]. Gaya tersebut tidak dapat diukur, sehingga dilakukan pengukuran berupa perbedaan tekanan. Dengan demikian, didapatkan hubungan faktor friksi dengan energi kinetik yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran. Faktor friksi tersebut berbanding terbalik dengan energi kinetik. Semakin cepat aliran fluida, maka energi kinetiknya semakin besar dan faktor friksi yang terjadi semakin kecil. Rasio faktor friksi kontaktor membran yang digunakan dengan faktor friksi pada pipa halus [12] berdasarkan hasil eksperimen

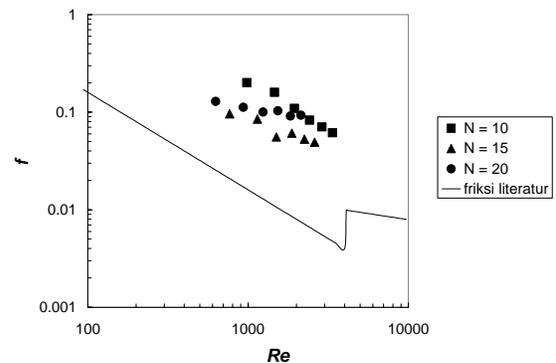
berkisar antara 4 hingga 15 kali lebih besar seperti diperlihatkan pada Gambar 8.



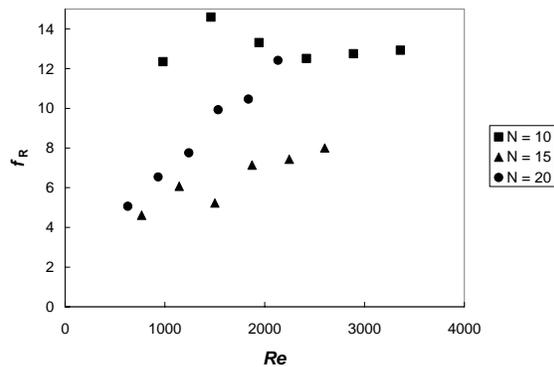
Gambar 5. Variasi hambatan perpindahan massa, R , gas CH₄-CO₂ dan N₂-CO₂ dan CO₂ murni terhadap laju alir air, v_L , untuk kontaktor dengan jumlah serat 20 buah



Gambar 6. Variasi penurunan tekanan air yang melewati kontaktor, ΔP , terhadap laju alir air, v_L .



Gambar 7. Variasi faktor friksi, f , terhadap bilangan Reynolds, Re .



Gambar 8. Variasi rasio faktor friksi, f_R , terhadap bilangan Reynolds, Re .

4. Kesimpulan

Penelitian ini telah dilakukan untuk melakukan studi penyerapan gas CO₂ dari campurannya dengan CH₄ atau N₂ menggunakan pelarut air melalui kontaktor membran serat berongga. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, fluks perpindahan CO₂ ke dalam air dapat mencapai sekitar $1,4 \times 10^{-7}$ mol/m².det dan koefisien perpindahan massanya dapat mencapai $1,23 \times 10^{-5}$ m/det. Fluks gas CO₂ seperti halnya dengan koefisien perpindahan massa di dalam kontaktor membran serat berongga, pada jumlah serat yang sama, bertambah besar dengan semakin meningkatnya kecepatan aliran pelarut yang melewati kontaktor. Sementara itu, pada kecepatan aliran pelarut yang sama, fluks dan koefisien perpindahan massanya berkurang dengan bertambahnya jumlah serat membran di dalam kontaktor.

Penurunan tekanan antara cairan masuk dan keluar kontaktor yang terjadi semakin besar dengan naiknya laju alir pelarut dan jumlah serat yang terdapat di dalam kontaktor membran. Untuk setiap kontaktor dengan jumlah serat yang berbeda, hubungan friksi dengan bilangan Reynolds yang terjadi memiliki tren yang sama, bahwa semakin besar bilangan Reynolds faktor friksi yang terjadi semakin kecil. Rasio faktor friksi kontaktor membran yang digunakan dengan faktor friksi pada pipa halus berdasarkan hasil eksperimen berkisar antara 4 hingga 15 kali lebih besar.

Daftar Acuan

- [1] Dortmund, David dan Doshi Kishore, Recent developments in CO₂ removal membran technology, <http://www.uop.com>, (15 Maret 2006).
- [2] D.O. Cooney, and C.C. Jackson, "Gas Absorption in a hollow fibre device", Chemical Engineering Communication, 61 (1987), pp. 159-167.
- [3] Zhang Qi and E.L. Cussler, "Microporous hollow fiber for gas absorption: I. Mass transfer in the liquid", Journal of Membrane Science, 23 (1985), pp. 321-332.
- [4] Huseni Rangwala, "Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Solutions Using Hollow Fiber Membrane Contactor", Elsevier, Journal Membrane of Science, 112 (1996), pp. 229-240.
- [5] Zhang, D.-Q., T.-M. Guo, and H. Knapp, "Experimental and modeling studies on the solubility of CO₂, CHClF₂, CHF₃, C₂H₂F₄ and C₂H₄F₂ in water and aqueous NaCl solutions under low pressures", Fluid Phase Equilib., 129 (1997), pp. 197-209.
- [6] T. Ahmed, M.J. Semmens, and M.A. Voss, "Energy loss characteristics of parallel flow bubbleless hollow fibre membrane aerators", Journal of Membrane Science, 171 (2000), pp. 87-96.
- [7] M. Mavroudi, S.P. Kaldis, and G.P. Sakellaropoulos, "A study of mass transfer resistance in membrane gas-liquid contacting processes", Journal of Membrane Science, 272 (1-2) (2006), pp. 103-115.
- [8] K.K. Sirkar, Other new membrane processes, in W.S.W. Ho and K.K. Sirkar (Eds.), Membrane Handbook, Chapman & Hall, New York, 1991, pp. 885-899.
- [9] A. Gabelman, and S.T. Hwang, "Hollow fibre membrane contactors", Journal of Membrane Science, 159 (1999), pp. 61-106.
- [10] M.J. Costello, A.G. Fane, P.A. Hogan, and R.W. Schofield, "The effect of shell side hydrodynamics on the performance of axial flow hollow fibre modules", Journal of Membrane Science, 80 (1993), pp. 1-11.
- [11] G.T. Vladislavljević, "Use of polysulfone hollow fibres for bubbleless membrane oxygenation/deoxygenation of water", Separation and Purification Technology, 17 (1999), pp. 1-10.
- [12] Bird, R. Byron, et.al., 1960, "Transport Phenomena", USA, John Wiley & Sons.
- [13] F. Lipnizki, and R.W. Field, "Mass transfer performance for hollow fibre modules with shell-side axial feed flow: using an engineering approach to develop a framework", Journal of Membrane Science, 193 (2001), pp. 195-208.