

Efek Polietilena Glikol Cair Terhadap Selektivitas Membran Selulosa Asetat untuk Pemisahan CH₄ dan CO₂ pada Tekanan Rendah

Oleh: **Adiwar**

Peneliti Madya pada Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi "LEMIGAS"
Jl. Ciledug Raya Kav. 109, Cipulir, Kebayoran Lama, P.O. Box 1089/JKT, Jakarta Selatan 12230 INDONESIA
Teregistrasi I Tanggal 12 Juni 2009; Diterima setelah perbaikan tanggal 16 Juli 2009
Disetujui terbit tanggal: 21 Desember 2009

S A R I

Proses pemisahan CO₂ dari gas bumi menggunakan teknologi membran merupakan alternatif pemisahan yang menjanjikan karena bersifat kompak dan fleksibel serta bersih lingkungan dan membutuhkan lebih sedikit energi dibandingkan teknologi absorpsi cairan. Proses membran membutuhkan tekanan sebagai gaya penggerak (*driving force*) yang seringkali telah dimiliki oleh sumber-sumber gas bumi bertekanan tinggi. Proses ini kurang efektif untuk umpan gas bertekanan rendah. Penambahan suatu media yang bersifat dapat melarutkan CO₂ pada membran diperkirakan dapat meningkatkan unjuk kerja membran. Pada penelitian ini dilihat pengaruh Polietilena Glikol (PEG) cair terhadap selektivitas membran selulosa asetat untuk pemisahan CH₄ dan CO₂ dengan gas umpan bertekanan rendah berkisar 10-100 psi.

Pengaruh PEG dilihat melalui beberapa variasi pada tahap preparasi membran, yaitu variasi komposisi, media penyimpanan, waktu evaporasi, konsentrasi PEG dan berat molekul PEG. Pembuatan membran menggunakan teknik inversi fase dengan presipitasi pencelupan. Permeabilitas membran diuji dengan sel permeasi. Pengujian permeabilitas ini dilakukan pada kondisi ideal, yaitu menggunakan umpan gas CH₄ dan CO₂ murni. Struktur membran dianalisis dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan PEG pada membran selulosa asetat menghasilkan selektivitas yang tinggi mencapai 71. Berdasarkan hasil SEM, membran dengan PEG memiliki struktur yang lebih padat (*dense*) dan lebih baik dalam menahan permeasi gas CH₄. Membran dengan PEG yang dihasilkan harus disimpan di dalam air untuk menjaga agar struktur porinya tidak berubah. Membran ini menghasilkan selektivitas yang lebih baik bila dievaporasi selama 60 detik. Selektivitas tertinggi ditunjukkan oleh membran dengan berat molekul PEG 400, dengan konsentrasi PEG 10% dan tekanan gas umpan 10 psig.

Kata kunci : membran selulosa asetat, PEG, selektivitas, permeabilitas

ABSTRACT

Membrane technology to separate CO₂ from natural gas is a promising alternative separation process for its compactness and flexibility and friendly environmentally and requires less energy compared to liquid absorption technology. Membrane process needs pressure as driving force which in most cases is already available in pressurized natural gas sources. The process is less effective for low-pressure gas stock. Blending of a media having a capacity of dissolving CO₂ to the membrane is presumed to increase membrane performance. This study is intended to see the effect of liquid polyethylene glycol on selec-

tivity of cellulose acetate membrane for CH₄ and CO₂ separation at low pressure feed gas ranging from 10-100 psi.

Effect of PEG was observed on some membrane preparation steps, viz composition variation, storage media, evaporation times, PEG concentration and molecular weight of PEG. Membranes is prepared by phase inversion technique. Permeability of CH₄ and CO₂ is measured using permeation cell and carried out at ideal state using pure CH₄ dan CO₂ Scanning Electron Microscopy (SEM) is used to see membrane structure.

The result shows that blending of PEG to cellulose acetate membrane increase selectivity up to 71. Scanning Electron Microscopy result shows that CA-PEG blend-membranes is relatively denser, and block CH₄ permeance better. Blending membrane produced should be kept in water to to keep the pore structure stay intake. The membrane give better selectivity when evaporated for 60 seconds. The highest selectivity is shown by membrane having 10 % PEG wit weight molecules of 400 at 10 psi feed gas pressure.

Keyword: Blend Membrane, cellulose acetate, PEG, selectivity, permeability

I. PENDAHULUAN

Gas bumi merupakan salah satu sumber energi yang sangat penting di dunia. Kandungan CO₂ pada gas bumi dapat menurunkan nilai kalor dan harus dihilangkan untuk meningkatkan kandungan energi gas bumi tersebut^[1]. Selain itu, gas CO₂ merupakan gas asam yang bersifat korosif sehingga dapat merusak bagian utilitas pabrik dan sistem perpipaannya.

Dalam proses pencairan gas bumi, CO₂ bersifat merugikan karena akan membeku pada suhu sangat rendah. Gas CO₂ mempunyai titik beku -78°C^[2], sedangkan proses pencairan gas bumi berlangsung sampai suhu -160°C. Ini berarti CO₂ akan membeku sebelum gas bumi berubah fase menjadi cair sehingga dapat menyumbat sistem perpipaan dan merusak pipa-pipa (*tubes*) pada alat penukar panas.

Melihat besarnya kerugian yang dapat ditimbulkan oleh CO₂ maka perlu dilakukan proses penghilangan CO₂ dari gas bumi. Batas maksimal kandungan CO₂ yang diperbolehkan biasanya 5% volume^[1]. Namun, ada juga yang membolehkan hanya sampai 2% volume untuk sistem perpipaan transportasi gas bumi dan 50 ppm untuk gas bumi yang dicairkan^[3].

Teknologi membran telah banyak diterapkan untuk pemisahan gas CO₂ dari gas bumi. Kelebihan teknologi ini adalah prosesnya yang sederhana, mudah, ramah lingkungan, serta konsumsi energi dan biaya operasional yang rendah^[4]. Selain itu, proses ini juga efektif untuk pemisahan gas dan cukup bersaing dengan proses-proses yang telah lebih dahulu dikembangkan seperti distilasi kriogenik, absorpsi dan *pressure-swing adsorption*^[5].

Proses membran memerlukan perbedaan tekanan sebagai gaya penggerak (*driving force*) agar diperoleh fluks gas CO₂ yang tinggi. Oleh karena itu, proses ini kurang efektif untuk umpan gas bertekanan rendah sehingga dibutuhkan kompresor untuk menaikkan tekanan gas umpan. Akan tetapi, penggunaan kompresor ini sangat mahal karena memerlukan biaya investasi dan biaya operasional yang besar.

Permeabilitas CO₂ dan selektivitas pemisahan CO₂ dan CH₄ telah dicoba ditingkatkan dengan penggabungan suatu absorber CO₂ ke dalam membran. Penggabungan tersebut dapat bersifat tidak tetap (*mobile*) di mana absorber dijenuhkan ke dalam pori-pori membran atau bersifat tetap (*fixed*) di mana absorber dimatrikskan kedalam fase membran^[6,7]. Polietilen Glikol (PEG) dikemukakan dapat melarutkan gas-gas asam seperti CO₂^[8]. Oleh karena itu, pada penelitian ini ingin dilihat pengaruh PEG cair, yang disatukan ke dalam membran, terhadap selektivitas membran selulosa asetat untuk pemisahan CH₄ dan CO₂ pada tekanan rendah dengan tujuan untuk menghindarkan penggunaan kompresor untuk menaikkan tekanan umpan. Pengaruh PEG dilihat melalui beberapa variasi pada tahap preparasi membran yaitu variasi komposisi PEG, media penyimpanan, waktu evaporasi dan berat molekul PEG.

II. TEORI

Kinerja suatu membran ditentukan oleh permeabilitas dan selektivitasnya. Permeabilitas adalah suatu besaran yang menggambarkan seberapa banyak gas dapat menembus membran karena suatu

perbedaan tekanan per area membran. Pemeabilitas ditentukan oleh nilai solubilitas dan difusivitas gas pada membran. Difusivitas bergantung pada diameter kinetik molekul gas yang akan dipisahkan. Semakin kecil diameter kinetik molekul gas, semakin tinggi difusivitasnya. Solubilitas ditentukan oleh sifat intrinsik gas terhadap membran. Membran harus dibuat dari bahan dasar yang memiliki afinitas yang tinggi terhadap molekul gas yang ingin dipisahkan^[9].

Selulosa asetat merupakan jenis polimer yang memiliki afinitas yang tinggi terhadap CO₂ sehingga sangat efektif untuk pemisahan CO₂ dari gas bumi. Selulosa asetat juga telah banyak digunakan secara komersial di industri karena lebih ekonomis dibanding beberapa polimer lain dan mudah didapat. Penambahan PEG yang memiliki kemampuan untuk menyerap gas CO₂ diharapkan dapat meningkatkan solubilitas gas CO₂ pada membran selulosa asetat sehingga permeabilitas dan selektivitas CO₂ dapat meningkat^[10].

Penggunaan aseton sebagai pelarut akan membentuk membran yang tidak berpori (*dense*) sehingga lebih baik dalam menahan gas CH₄. Penambahan formamida dalam komposisi larutan CA-aseton dapat memperbaiki struktur membran sehingga akan meningkatkan permeabilitas membran.

Pembuatan membran dilakukan dengan teknik inversi fase dengan media koagulasi air. Teknik inversi fase digunakan untuk membentuk membran asimetrik agar dihasilkan permeabilitas CO₂ yang tinggi^[11].

III. PERCOBAAN

A. Preparasi Membran

Pada penelitian ini digunakan polimer selulosa asetat yang diproduksi oleh Aldrich dengan kandungan asetil 39,8%. Aseton, formamida, PEG 400 dan PEG 600 yang digunakan diproduksi oleh Merck sedangkan PEG 200 dan PEG 300 diproduksi oleh Fluka.

Pembuatan membran dilakukan menggunakan teknik inversi fase dengan presipitasi pencelupan. Selulosa asetat dilarutkan dengan aseton kemudian ditambahkan formamida dengan komposisi CA, aseton dan formamida 24%, 52% dan 24%. Setelah itu, larutan ditambahkan PEG dengan komposisi 10% dari berat CA. Larutan diaduk hingga homogen kemudian didiamkan untuk menghilangkan gelembung. Larutan ini selanjutnya dibentuk menjadi membran lembaran

dengan menggunakan *doctor knife*, setelah itu dilakukan evaporasi pelarut dengan variasi waktu evaporasi 0-60 detik. Membran kemudian direndam di dalam bak koagulasi berisi air dingin dengan suhu 10°C selama 1 jam. Setelah itu, membran direndam di dalam air panas bersuhu 70°C selama 10 menit. Membran yang telah siap kemudian disimpan di dalam desikator dan air.

Pada tahap preparasi membran di atas dilakukan beberapa variasi yaitu waktu evaporasi (0-60 detik), media penyimpanan (air dan desikator), komposisi PEG (5%, 10% dan 15% dari berat CA) dan berat molekul PEG (200, 300, 400 dan 600).

B. Analisis Struktur Membran

Struktur membran yang telah dibuat dianalisis dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) di mana membran yang akan dianalisis dipatahkan dalam nitrogen cair untuk mendapatkan patahan melintang dan membujur yang baik. Membran tersebut kemudian dilapisi emas dengan ketebalan 100-300Å dan difoto dengan perbesaran tertentu.

Membran yang dianalisis dengan SEM antara lain membran dengan 10% PEG 200, 400 dan 600.

C. Pengujian membran

Gas yang digunakan dalam penelitian ini merupakan gas CH₄ dan CO₂ murni yang diproduksi oleh PT BOC dan memiliki tingkat kemurnian 99%.

Pengujian dilakukan dengan metode *variable volume*. Skema peralatan pengujian dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

Membran diletakkan di dalam sel permeasi kemudian dialirkan gas CH₄ atau CO₂ murni dengan variasi tekanan umpan (10-100 psig). Pada masing-masing variasi tekanan, gas yang telah melewati membran dialirkan ke *flowmeter* dan diukur waktu tempuhnya untuk 3 variasi jarak sehingga didapatkan kecepatan linear gas.

D. Penentuan Selektivitas Membran

Dari data kecepatan linear gas (dL/dt), dihitung laju permeasi gas yang menembus membran dengan persamaan:

$$Q = Ax \frac{dL}{dt} \quad (1)$$

Setelah itu, dihitung laju alir gas pada kondisi standar (Q_{STP}), 1 atm dan 273 K, yaitu :

$$Q_{STP} = Q \times \frac{273}{T + 273} \quad (2)$$

Laju permeasi gas murni pada membran kemudian ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$\frac{P}{l} = \frac{Q_{STP}}{Am(P_i - P_0)} \quad (3)$$

Selektivitas ideal (α) membran merupakan perbandingan antara laju permeasi gas CO_2 terhadap gas CH_4 yaitu:

$$\alpha_{CO_2/CH_4} = \frac{P/l_{(CO_2)}}{P/l_{(CH_4)}} \quad (4)$$

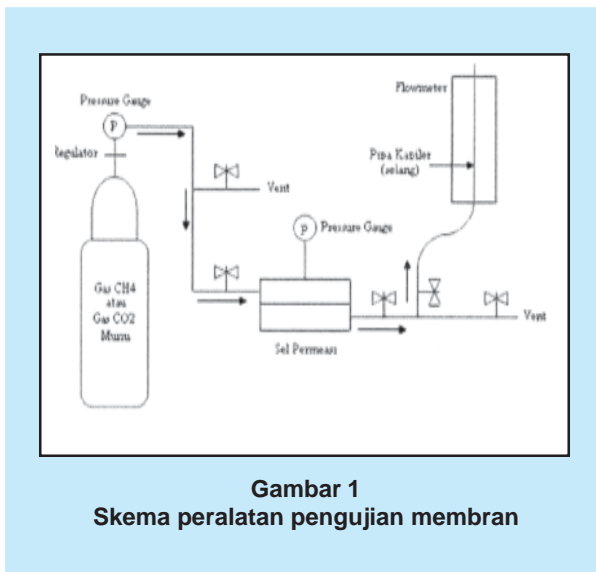
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengaruh Penambahan PEG

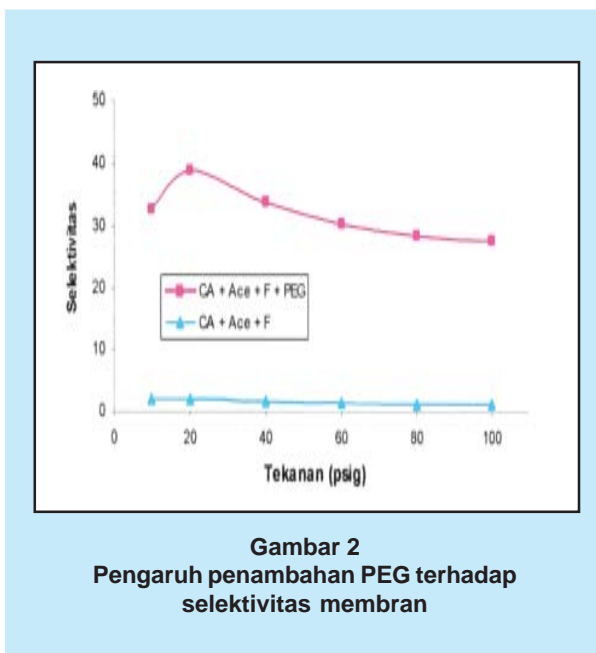
Untuk melihat adanya pengaruh PEG, pada penelitian ini dibandingkan selektivitas antara membran tanpa PEG dan membran dengan PEG. Gambar 2 menunjukkan perbedaan selektivitas yang dihasilkan oleh kedua jenis membran tersebut pada variasi tekanan 10-100 psig.

Berdasarkan gambar di atas dapat dilihat bahwa penambahan PEG pada membran dengan komposisi selulosa asetat, aseton dan formamida menghasilkan selektivitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan membran tanpa PEG. Membran tanpa PEG selektivitas tertinggi hanya mencapai 1,8 sedangkan membran dengan PEG mencapai 38.

Rendahnya selektivitas membran tanpa PEG ini kemungkinan disebabkan banyaknya *defect* (cacat) yang terdapat pada membran. Penambahan PEG akan meningkatkan densitas membran sehingga membran yang terbentuk akan lebih padat. Membran yang lebih padat akan mengurangi kemungkinan terjadinya *defect* pada membran. *Defect* dapat menyebabkan fluks gas CH_4 meningkat karena gas tidak terhalang oleh *top layer* melainkan langsung menuju lapisan berpori. Oleh karena itu, membran tanpa PEG menghasilkan laju permeasi CH_4 yang lebih tinggi dibandingkan membran dengan PEG seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 1
Skema peralatan pengujian membran



Gambar 2
Pengaruh penambahan PEG terhadap selektivitas membran

B. Pengaruh Media Penyimpanan

Membran yang akan digunakan untuk proses pemisahan gas harus kering dari air. Salah satu cara untuk mengeringkan membran adalah dengan menyimpan membran di dalam desikator. Untuk selulosa asetat, penyimpanan di dalam desikator dapat menyebabkan pori membran menjadi *collapse* (rubuh) sehingga membran menjadi rapuh dan ketahanan mekaniknya rendah. Oleh karena itu, untuk mencegah terjadinya hal tersebut, membran harus disimpan di dalam air.

Berdasarkan keadaan di atas, pada penelitian ini, dilihat juga pengaruh PEG melalui variasi media penyimpanan. Gambar 4 memperlihatkan pengaruh media penyimpanan terhadap selektivitas membran dengan PEG.

Berdasarkan Gambar 4, membran yang disimpan di dalam air memberikan selektivitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan membran yang disimpan di dalam desikator. Hal ini menunjukkan bahwa membran dengan PEG juga harus disimpan di dalam air dan tidak dapat disimpan di dalam desikator. Penyimpanan di dalam air akan menjaga struktur pori membran tidak berubah dan tidak *collapse*. Gambar 5 memperlihatkan bahwa membran yang disimpan di dalam air lebih baik dalam menahan laju permeasi gas CH₄ dibandingkan dengan membran yang disimpan dalam desikator.

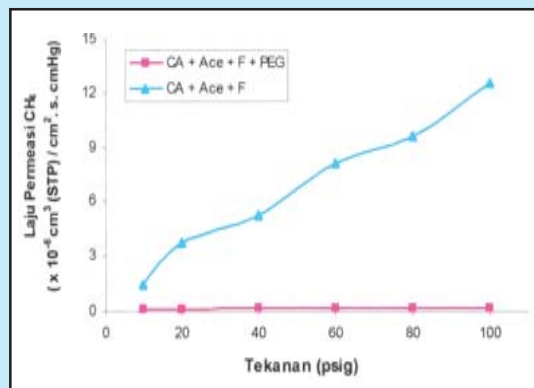
C. Pengaruh Waktu Evaporasi

Pada penelitian ini dilihat pengaruh waktu evaporasi pada membran dengan PEG. Gambar 6 memperlihatkan selektivitas membran untuk variasi waktu evaporasi antara 0-60 detik.

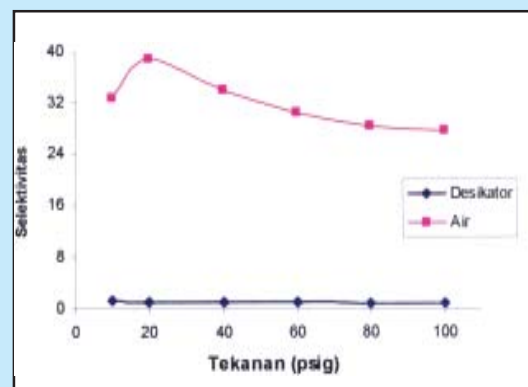
Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa membran dengan waktu evaporasi 60 detik menghasilkan selektivitas yang tinggi yang mencapai 61. Hal ini disebabkan semakin lama waktu evaporasi maka semakin banyak aseton yang teruapkan, sehingga konsentrasi polimer pada bagian *top layer* akan meningkat. Meningkatnya konsentrasi polimer menyebabkan *top layer* pada membran semakin padat. Hal ini ditunjukkan oleh warna membran, di mana membran dengan waktu evaporasi 60 detik lebih bening dibandingkan membran dengan waktu evaporasi 0 dan 15 detik seperti terlihat pada Tabel 1. Warna bening pada membran menunjukkan bahwa membran tersebut semakin padat (*dense*) sedangkan warna putih menunjukkan bahwa membran tersebut berpori.

Top layer yang semakin padat ini mengakibatkan gas CH₄ semakin sulit melewati membran. Oleh karena itu, membran dengan waktu evaporasi 60 detik lebih mampu menahan gas CH₄ seperti ditunjukkan oleh Gambar 7.

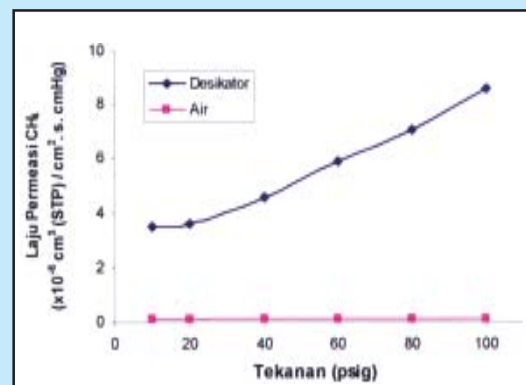
Gambar 7 memperlihatkan bahwa semakin padat *top layer* membran, maka semakin kecil laju permeasi gas CH₄ yang dihasilkan. Namun sebagai konsekuensinya, permeabilitas gas CO₂ juga lebih rendah dibandingkan dengan membran yang waktu



Gambar 3
Pengaruh penambahan PEG terhadap laju permeasi CH₄



Gambar 4
Pengaruh media penyimpanan terhadap selektivitas membran



Gambar 5
Pengaruh media penyimpanan terhadap laju permeasi CH₄

evaporasinya lebih cepat seperti ditunjukkan Gambar 8.

Rendahnya laju permeasi CO₂ seperti yang diperlihatkan oleh gambar di atas dikarenakan dengan semakin padatnya *top layer*, maka gas CO₂ akan semakin sulit berdifusi. Akan tetapi meskipun demikian, selektivitas yang dihasilkan oleh membran dengan waktu evaporasi 60 detik tetap lebih tinggi dibandingkan membran dengan waktu evaporasi yang lebih cepat seperti yang terlihat pada Gambar 6.

D. Pengaruh Konsentrasi PEG

Pada Gambar 9 diperlihatkan pengaruh konsentrasi PEG terhadap selektivitas membran.

Berdasarkan gambar di atas dapat dilihat bahwa membran dengan konsentrasi PEG sebesar 5% umumnya memiliki selektivitas yang lebih rendah dibandingkan membran dengan konsentrasi PEG sebesar 10% dan 15%. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, penambahan PEG akan membuat matriks membran semakin padat. Oleh karena itu, semakin tinggi konsentrasi PEG, maka semakin padat pula matriks membran yang terbentuk. Hal ini menyebabkan membran dengan konsentrasi PEG yang lebih tinggi lebih baik dalam menahan gas CH₄ seperti ditunjukkan oleh Gambar 10.

Namun demikian membran yang dibuat dengan konsentrasi PEG 15% tidak memperlihatkan unjuk kerja yang lebih baik dibandingkan membran yang dibuat dengan konsentrasi PEG 10%.

E. Pengaruh Berat Molekul PEG

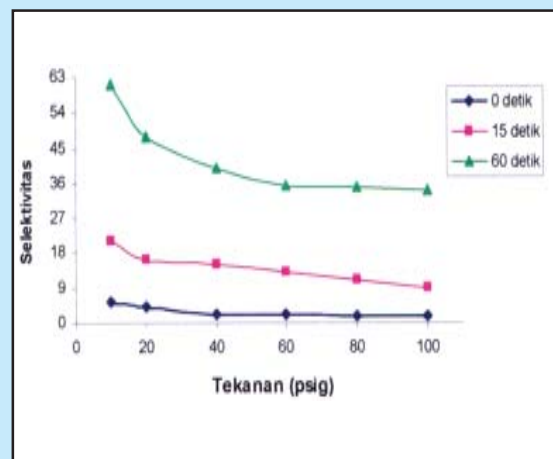
PEG dengan berat molekul 200, 300, 400 dan 600 semuanya berbentuk cair. Pada penelitian ini dilihat pengaruh berat molekul PEG terhadap selektivitas membran. Gambar 11 memperlihatkan hubungan antara tekanan dan selektivitas untuk berbagai berat molekul PEG cair.

Gambar 11 menunjukkan bahwa membran dengan PEG 400 menunjukkan hasil yang paling baik dengan selektivitas tertinggi mencapai 71 pada tekanan 10 psig. Pada Gambar 12 diperlihatkan laju permeasi CO₂ untuk berbagai berat molekul tersebut.

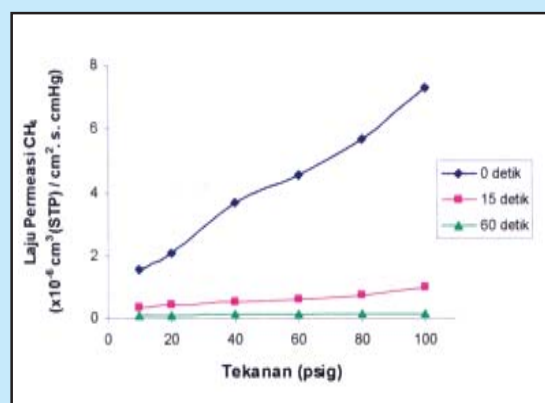
Berdasarkan kedua gambar di atas terlihat jelas

Tabel 1
Pengaruh Waktu Evaporasi terhadap Warna Membran

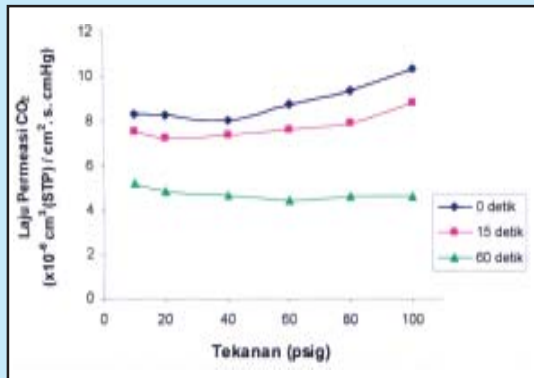
Komposisi (% berat)			BM PEG	Konsentrasi PEGl (% CA)	Waktu Evaporasi (detik)	Pengamatan Warna
CA	Aseton	Formamida				
25	52	24	400	10	15	Putih
					30	Baur
					60	Bening



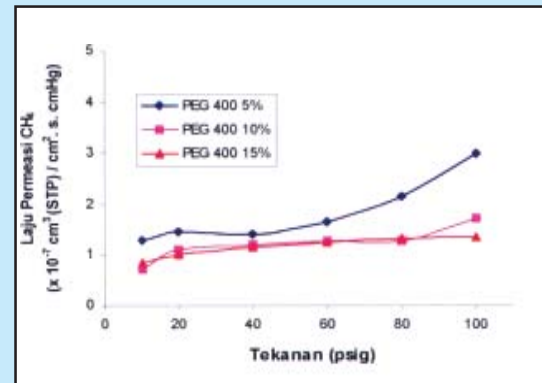
Gambar 6
Pengaruh waktu evaporasi terhadap selektivitas



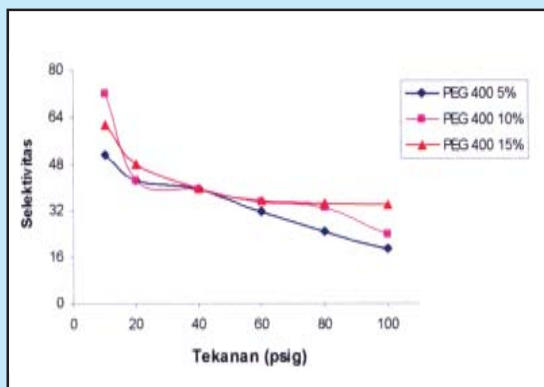
Gambar 7
Pengaruh waktu evaporasi terhadap laju permeasi CH₄



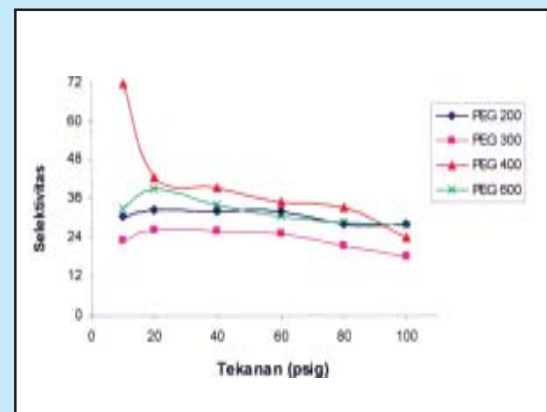
Gambar 8
Pengaruh waktu evaporasi terhadap laju permeasi CO₂



Gambar 10
Pengaruh konsentrasi PEG terhadap laju permeasi CH₄



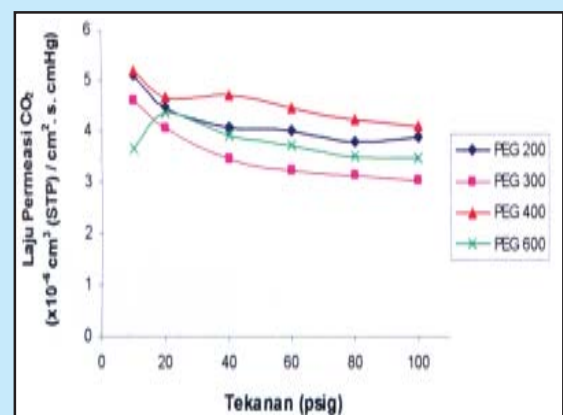
Gambar 9
Pengaruh konsentrasi PEG terhadap selektivitas membran



Gambar 11
Pengaruh berat molekul terhadap selektivitas

bahwa membran dengan PEG 400 menghasilkan laju permeasi yang paling tinggi yang karenanya menghasilkan selektivitas yang tinggi pula.

Faktor yang menentukan permeabilitas gas pada suatu membran adalah solubilitas dan difusivitas. Semakin tinggi berat molekul PEG maka difusivitas gas CO₂ akan semakin meningkat, sebaliknya solubilitas gas CO₂ akan menurun^[10,11]. Merujuk pada literatur tersebut, maka membran dengan PEG yang paling rendah, yaitu PEG 200, menghasilkan difusivitas CO₂ yang paling rendah, namun menghasilkan solubilitas CO₂ yang paling tinggi dan sebaliknya, membran dengan berat molekul PEG paling tinggi, yaitu PEG 600, menghasilkan membran dengan difusivitas CO₂ yang paling tinggi namun menghasilkan solubilitas CO₂ yang paling rendah.



Gambar 12
Pengaruh berat molekul terhadap laju permeasi CO₂

Hasil dari penelitian ini yang memberikan selektivitas tertinggi pada PEG 400 sejalan dengan keterangan tersebut di mana PEG 400 menghasilkan membran dengan kombinasi difusivitas dan solubilitas yang optimal dibandingkan dengan membran yang dihasilkan oleh PEG 200, 300 dan 600.

Hasil SEM (*Scanning Electron Mecroscopy*) menunjukkan bahwa membran dengan berat molekul PEG 400 mempunyai struktur membran yang lebih kompak, tidak terlalu berpori seperti membran dengan PEG 200 dan tidak terlalu padat seperti membran dengan PEG 600 seperti diperlihatkan oleh Gambar 13.

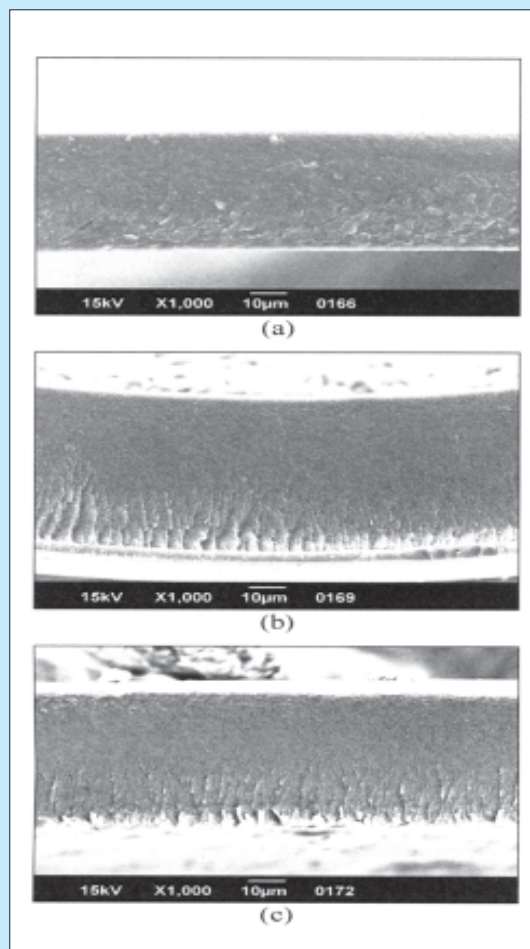
V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

- Membran dengan penambahan PEG memiliki selektivitas yang lebih tinggi dibandingkan membran tanpa PEG.
- Membran tanpa PEG selektivitas tertinggi hanya mencapai 1,8 pada tekanan 10 psig.
- Membran dengan PEG mampu mencapai selektivitas hingga 71 pada tekanan 10 psig.
- Membran dengan PEG yang disiapkan secara teknik fasa inverse harus tetap disimpan di dalam air untuk menjaga agar struktur membran dan porinya tidak berubah
- Waktu evaporasi 60 detik pada pembuatan membran dengan PEG menghasilkan selektivitas yang lebih baik dibandingkan dengan waktu evaporasi 0 dan 15 detik.
- Membran dengan konsentrasi PEG 10% dan 15% menunjukkan performa yang lebih baik dalam menahan gas CH₄ sehingga menghasilkan selektivitas yang tinggi.
- Membran dengan berat molekul PEG 400 menghasilkan selektivitas yang lebih tinggi dibandingkan membran dengan berat molekul PEG 200, 300 dan 600

DAFTAR NOTASI

α_{CO_2/CH_4}	selektifitas ideal gas CO ₂ terhadap CH ₄
ΔP	beda tekanan umpan dan permeat (cmHg)
A	luas penampang pipa kapiler (cm ²)
A_m	luas penampang membran (cm ²)



Gambar 13
Hasil SEM membran dengan PEG 200 (a),
PEG 400 (b) dan PEG 600 (c)

dL/dt	jarak yang ditempuh propanol untuk waktu tertentu (cm/s)
l	tebal membran (cm)
P	permeabilitas gas murni (cm ³ cm/cm ² .s.cmHg)
P_i	tekanan umpan (cmHg)
P_o	tekanan permeat (cmHg)
$P/l_{(CH_4)}$	laju permeasi gas CH ₄ murni (cm ³ _(STP) /cm ² .s.cmHg)
$P/l_{(CO_2)}$	laju permeasi gas CO ₂ murni (cm ³ _(STP) /cm ² .s.cmHg)
Q	laju alir permeat (cm ³ _(STP) /s)
Q_{STP}	laju alir gas permeat pada kondisi STP (cm ³ _(STP) /s)
T	suhu percobaan = suhu ruang

KEPUSTAKAAN

1. Speight, James G., (1991), "*The Chemistry and Technology of Petroleum*", 2nd Ed., Marcel Dekker Inc, New York.
2. Perry, Robert H. dan Don W. Green, (1999), "*Perry's Chemical Engineer's Handbook*", McGraw-Hill.
3. Lin, Haiqing dan Benny D. Freeman, (2004), "Materials Selection Guidelines for Membranes that Remove CO₂ from Gas Mixtures", *Journal of Molecular Structure*, xx, pp. 1-18.
4. Mulder, Marcel, (1996), "*Basic Principle of Membrane Technology*", 2nd Ed., Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
5. Freeman, B.D. dan I. Pinnau, (1999), "*Polymer Membranes for Gas and Vapor Separation*", American Chemical Society, Washington D.C.
6. Quinn, R., J.B. Appleby dan G.P. Pez, (1995), "New Facilitated Transport for the Separation of Carbon Dioxide from Hydrogen and Methane", *Journal of Membrane Science*, 104, pp. 139-146.
7. Teramoto, Masaaki, Satoshi Kitada, Nobuaki Ohnishi, Hideto Matsuyama dan Norifumi Matsumiya, (2003), "Separation and Concentration of CO₂ by Capillary-Type Facilitated Transport Membrane Module with Permeation of Carrier Solution", *Journal of Membrane Science*, 234, pp. 83-94.
8. Kuehne, D. L., dan Friedlander S. K., (1980), *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, 19, 609.
9. Fane, A.G., (2000), "*Introduction to Membrane Science and Techology*", School of Chemical Engineering Industrial Chemistry, The University of New South Wales, Sydney, Australia.
10. Baker, Richard W., (2000), "*Membrane Technology and Applications*", McGraw-Hill.
11. Schendel, Ronald L., (1984), "*Gas Separation Membranes and The Gas Industry*", Fluor Engineers Inc, PCGA Transmission Conference, California.